

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES

SUBDIRECCIÓN DE POSGRADO



**CRECIMIENTO Y PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DE *Tectona grandis*
L. F. (TECA) DE UNA PLANTACIÓN COMERCIAL EN MICHOACÁN MÉXICO**

Por:

RICARDO TELLES ANTONIO

Como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRÍA EN CIENCIAS FORESTALES

JULIO, 2016

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTAL
CRECIMIENTO Y PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DE *Tectona grandis* L. F.
(TECA) DE UNA PLANTACIÓN COMERCIAL EN MICHOACÁN MÉXICO

TESIS DE MAESTRÍA

Como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRÍA EN CIENCIAS FORESTALES


Presenta

Ing. Ricardo Telles Antonio

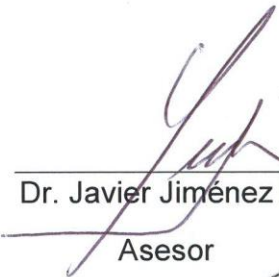
Comité de tesis



Dr. Eduardo Alanís Rodríguez
Director



Dr. Oscar A. Aguirre Calderón
Asesor



Dr. Javier Jiménez Pérez
Asesor



Dr. Martín Gómez Cárdenas
Asesor Externo

JULIO, 2016

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el aporte económico brindado para la realización de mis estudios de Maestría.

A la Facultad de Ciencias Forestales (FCF) de la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL) por aceptarme como estudiante del Programa de Posgrado.

Al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP); a través del Campo Experimental Uruapan por las facilidades otorgadas para la realización de este trabajo.

Al Instituto Tecnológico de El Salto; Pueblo Nuevo Durango por las facilidades otorgadas para la realización de los ensayos de las propiedades físico-mecánicas de la madera.

Al Ing. H. Jesús Muñoz Flores, Investigador del Campo Experimental Uruapan del INIFAP, por las facilidades para la realización del presente trabajo.

Al Dr. Juan Abel Nájera Luna, investigador del Instituto Tecnológico de El Salto, por las facilidades para la realización de los ensayos físico-mecánicos.

Al Dr. Eduardo Alanís Rodríguez, por aceptar dirigir este trabajo de tesis, su apoyo profesional, académico y moral en el trayecto de mi formación.

Al Dr. Oscar Alberto Aguirre Calderón, Dr. Javier Jiménez Pérez, por formar parte del Comité de tesis; por el conocimiento aportado para la realización y culminación del trabajo de investigación.

Al Dr. Martín Gómez Cárdenas y MC Juan Carlos Guzmán; por su atención especial, la disposición y paciencia mostrada durante la elaboración del presente.

Al Dr. Ricardo López Aguillón, por su aporte de ideas al presente trabajo.

A los catedráticos de la Facultad de Ciencias Forestales por el conocimiento transmitido tanto teórico como práctico.

DEDICATORIA

A mi madre Dominga Antonio Santos con respeto, admiración y orgullo por ser el pilar fundamental en todo lo que soy, por su incondicional apoyo recibido a través del tiempo.

A mis hermanos, cuñadas y sobrinos.

A mis amigos Luis Alfredo Cárdenas Macías, Erick Marín, Fátima Narciso, Mayra Jiménez, Claudia Iveth Mendoza, Alejandra, Liliana Saucedo, Geraldine García.

A mis compañeros y amigos de generación de Maestría por todos los momentos compartidos: Angelina Bautista, Rigoberto González, Eleney Viveros, Ángel Alfredo Colazo, Sergio Rosales, Antonio Vega, Edmundo Villalón, Astrid Mata.

ÍNDICE

| | |
|--|----|
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| HIPÓTESIS..... | 2 |
| OBJETIVOS..... | 2 |
| General..... | 2 |
| Particulares..... | 2 |
| CAPÍTULO I. CRECIMIENTO DE <i>Tectona grandis</i> L. f. (TECA) EN UNA PLANTACIÓN COMERCIAL EN NUEVO URECHO MICHOACÁN..... | 3 |
| RESUMEN..... | 3 |
| ABSTRACT | 4 |
| INTRODUCCIÓN..... | 5 |
| OBJETIVO..... | 6 |
| MATERIALES Y MÉTODOS | 6 |
| Descripción del área de estudio | 6 |
| Localización | 6 |
| Orografía..... | 6 |
| Hidrografía | 7 |
| Clima..... | 7 |
| Suelo..... | 7 |
| Topografía..... | 7 |
| Vegetación | 8 |
| Descripción de <i>Tectona grandis</i> L. f. | 8 |
| Clasificación taxonómica de <i>Tectona grandis</i> L. f. | 8 |
| Descripción botánica de <i>Tectona grandis</i> L. f. | 8 |
| Corteza | 9 |
| Hojas..... | 9 |
| Inflorescencia..... | 9 |
| Flores | 9 |
| Fruto..... | 9 |
| Origen y distribución. | 10 |

| | |
|--|----|
| Clima..... | 10 |
| Suelo..... | 10 |
| Producción de la planta..... | 11 |
| Establecimiento de la plantación..... | 11 |
| Espaciamiento y densidad de plantación..... | 11 |
| Aplicación de riegos de auxilio..... | 11 |
| Mantenimiento de la plantación y labores culturales..... | 11 |
| Medidas de protección..... | 12 |
| Tipo e intensidad de muestreo..... | 12 |
| Toma de datos..... | 12 |
| Variables cuantitativas..... | 12 |
| Supervivencia..... | 13 |
| Medición de diámetro de tocón..... | 13 |
| Medición de diámetro normal (DAP)..... | 13 |
| Medición de la altura total..... | 13 |
| Medición de diámetro copa..... | 13 |
| Variables cualitativas..... | 14 |
| Evaluación del fuste..... | 14 |
| Daños mecánicos..... | 14 |
| Vigor del arbolado..... | 14 |
| Estado fitosanitario..... | 15 |
| Evaluación de la clase silvícola..... | 15 |
| Análisis y procesamiento de datos..... | 15 |
| RESULTADOS Y DISCUSIÓN..... | 17 |
| Variables cuantitativas..... | 17 |
| Variables Cualitativas..... | 21 |
| CONCLUSIONES..... | 23 |
| REFERENCIAS..... | 24 |
| CAPÍTULO II. AJUSTE Y SELECCIÓN DE MODELOS MATEMÁTICOS PARA PREDECIR EL VOLUMEN TOTAL DEL FUSTE PARA <i>Tectona grandis</i> L. f. EN EL ESTADO DE MICHOACÁN..... | 27 |
| RESUMEN..... | 27 |

| | |
|---|----|
| ABSTRACT | 28 |
| INTRODUCCIÓN..... | 29 |
| OBJETIVO..... | 30 |
| MATERIALES Y MÉTODOS | 30 |
| Área de Estudio..... | 30 |
| Datos dasométricos..... | 31 |
| Modelos de volumen total..... | 33 |
| Criterios de evaluación | 35 |
| RESULTADOS | 36 |
| DISCUSIÓN..... | 42 |
| CONCLUSIONES | 43 |
| REFERENCIAS | 44 |
| CAPÍTULO III. PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DE <i>Tectona grandis</i> L. f. DE UNA PLANTACIÓN COMERCIAL EN NUEVO URECHO, MICHOACÁN .. | 48 |
| RESUMEN..... | 48 |
| ABSTRACT | 49 |
| INTRODUCCIÓN..... | 50 |
| OBJETIVO..... | 51 |
| MATERIALES Y MÉTODOS | 51 |
| Área de estudio | 51 |
| Selección de los árboles muestra..... | 52 |
| Preparación de las probetas..... | 53 |
| Determinación de propiedades físicas | 53 |
| Contenido de humedad..... | 53 |
| Contracción de la madera | 54 |
| Relación de anisotropía | 54 |
| Densidad de la madera | 55 |
| Determinación de las propiedades mecánicas | 56 |
| Compresión paralela al grano | 56 |

| | |
|--|----|
| Compresión perpendicular al grano | 57 |
| Dureza Janka | 58 |
| Cizalla o cortante paralelo al grano | 59 |
| Desgarre o clivaje | 59 |
| RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 60 |
| Propiedades físicas | 60 |
| Propiedades mecánicas | 63 |
| CONCLUSIONES | 68 |
| REFERENCIAS | 69 |

ÍNDICE DE TABLAS

| Tabla | | Página |
|-------|---|--------|
| 1 | Estadísticos de las variables medidas..... | 33 |
| 2 | Modelos matemáticos evaluados para la estimación del volumen total para <i>T. grandis</i> L. f. en Nuevo Urecho Michoacán..... | 35 |
| 3 | Valores de los estadísticos de bondad de ajuste de los seis modelos evaluados en la estimación del volumen total del fuste de <i>T. grandis</i> L. f..... | 37 |
| 4 | Sistema de calificación para los modelos de volumen total del fuste..... | 38 |
| 5 | Factores de ponderación utilizados en la regresión del modelo de Meyer (1941)..... | 39 |
| 6 | Valor ponderado de los criterios de los parámetros estadísticos del modelo de Meyer (1941)..... | 40 |
| 7 | Características dasométricas de los árboles seleccionados para los ensayos físicos y mecánicos..... | 52 |
| 8 | Propiedades físicas de la madera de <i>Tectona grandis</i> L. f., Nuevo Urecho, Michoacán..... | 61 |
| 9 | Comparación de las propiedades físicas para <i>Tectona grandis</i> L. f. en estudios de otras procedencias..... | 63 |
| 10 | Propiedades mecánicas de la madera de <i>Tectona grandis</i> L. f., creciendo en Nuevo Urecho, Michoacán..... | 66 |
| 11 | Valores promedio de propiedades mecánicas para madera de <i>Tectona grandis</i> L. f. en estudios de otras procedencias... | 67 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| Figura | | Página |
|--------|--|--------|
| 1 | Ubicación de la plantación comercial de <i>Tectona grandis</i> L. f., establecida en el paraje “El Mirador”, Nuevo Urecho, Michoacán..... | 6 |
| 2 | Dinámica del DAP de árboles de <i>T. grandis</i> a través del tiempo..... | 17 |
| 3 | Se muestra el comportamiento de árboles de <i>T. grandis</i> en cuanto al Diámetro de Tocón (cm)..... | 18 |
| 4 | Dinámica en Área Basal de árboles de <i>T. grandis</i> a través del tiempo..... | 19 |
| 5 | Dinámica en Altura de árboles de <i>T. grandis</i> a través del tiempo..... | 20 |
| 6 | Dinámica en Volumen (m ³)/Sitio de árboles de <i>T. grandis</i> a través del tiempo..... | 21 |
| 7 | Se muestra el Estado Fitosanitario (%) de árboles de <i>T. grandis</i> | 21 |
| 8 | Se muestra la Clase Silvícola (%) de árboles de <i>T. grandis</i> ... | 22 |
| 9 | Se muestra el Vigor (%) de árboles de <i>T. grandis</i> | 23 |
| 10 | Comportamiento del diámetro (a) y del volumen acumulado con respecto a la altura sobre el fuste (b)..... | 33 |
| 11 | Dispersión de datos entre el volumen de fuste total y el diámetro normal..... | 34 |
| 12 | Distribución de residuos del modelo de volumen total de Meyer (1941) para <i>T. grandis</i> ; (a) sin regresión ponderada y (b) con regresión ponderada..... | 41 |
| 13 | Porcentaje de frecuencias relativas acumuladas de los residuales frente a la distribución normal para el modelo de Meyer (1941) para <i>T. grandis</i> L. f. en Nuevo Urecho, Michoacán..... | 41 |

INTRODUCCIÓN

Una plantación forestal comercial es el establecimiento y manejo de especies forestales en terrenos de uso agropecuario o terrenos que han perdido su vegetación forestal natural, con el objeto de producir materias primas maderables y no maderables, para su industrialización y/o comercialización (CONAFOR, 2014). En México existen aproximadamente 22 millones de hectáreas aptas para desarrollar plantaciones forestales comerciales, de las cuales la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) ha definido 13.9 millones de hectáreas como prioritarias con calidad de suelos y climas favorables para obtener un crecimiento rápido, mano de obra disponible y un mercado interno que demanda más materias primas forestales cada día (CONAFOR, 2014).

Una especie forestal exótica importante para las plantaciones forestales comerciales en México es la teca (*Tectona grandis* L. f.), la cual se ha adaptado bien en regiones de los estados de Campeche, Chiapas, Tabasco, Veracruz, Michoacán y Nayarit (CONAFOR, 2013).

La teca es una especie importante por el alto precio que alcanza su madera; la rapidez de su crecimiento es intermedia y se han propuesto turnos de 20 a 30 años, aunque la madera de árboles más jóvenes también tiene buena aceptación comercial (Camacho *et al.*, 2014). Es usada para la construcción de puentes y muelles (por su excelente resistencia al agua), vagones y durmientes de ferrocarril, carpintería e incluso se utiliza para la cubierta de los barcos (FAO, 2010). En México, se estima el consumo anual de teca en 12.5 millones de m³, mientras que la producción local es de 9.4 millones de m³, lo que genera la necesidad de estar importando de otros países. Al 2014 existen 25,324 ha plantadas de teca (CONAFOR, 2014).

HIPÓTESIS

Los descriptores estadísticos del crecimiento de la plantación comercial de *Tectona grandis* L. f. en Michoacán tienen semejanza con lo reportado en la literatura sobre otras plantaciones en México y otras regiones del mundo.

Las propiedades físico-mecánicas de la plantación comercial de *Tectona grandis* L. f. son similares con lo reportado en la literatura sobre otras plantaciones en México y otras regiones del mundo.

OBJETIVOS

General

Evaluación del crecimiento y propiedades físico-mecánicas de madera de *Tectona grandis* L. f. (Teca) en la plantación forestal comercial establecida en Nuevo Urecho Michoacán.

Particulares

- 1.-Evaluar el crecimiento de la plantación comercial de *Tectona grandis* L. f.
- 2.-Ajustar y seleccionar un modelo matemático para predecir volumen total del fuste para una plantación de teca (*Tectona grandis* L. f.) a los 11 años de establecida en Nuevo Urecho, Michoacán.
- 3.-Determinar las propiedades físico-mecánicas de la madera de teca de una plantación comercial en Nuevo Urecho, Michoacán y compararlas con otras experiencias en México y de otras regiones del mundo.

CAPÍTULO I. CRECIMIENTO DE *Tectona grandis* L. f. (TECA) EN UNA PLANTACIÓN COMERCIAL EN NUEVO URECHO MICHOACÁN.

RESUMEN

El objetivo fue evaluar el crecimiento de una plantación comercial de *Tectona grandis* L. f. establecida en Nuevo Urecho, Michoacán. La plantación se estableció en julio del 2003, en una superficie de 3 ha; sitios de muestreo circulares con un radio de 8.92 m y área de 250 m², se tomó información en 6 sitios que forman 1,500 m² que corresponden a una intensidad de muestreo del 5 %. Se realizó una sola medición, a los 7 y 11 años de haberse establecido; las mediciones de las variables cuantitativas; diámetro de tocón a 30 cm del suelo, diámetro normal (DAP), altura total, diámetro de copa; se realizaron con cinta diamétrica, flexómetro y dendrómetro Criterion® RD1000; se evaluaron variables cualitativas; estado fitosanitario, vigor, fuste y clase silvícola. En base a los inventarios levantados; el diámetro a la altura del pecho, presenta valores de 14.72 y 16.01 cm promedio; el diámetro de tocón presentó promedios de 18.40 y 19.16 cm; área basal (m²) muestra 0.0106 y 0.0205 m² por sitio; altura total del arbolado va de 10.96 a 12.76 m; el volumen (m³)/sitio a los 7 años presenta 2.56m³ y a los 11 años 3.54m³. Estado fitosanitario; 95% sano y 5% enfermo; clase silvícola con 61% de arbolado dominante, 22% codominante y 16% suprimido; vigor del arbolado 85% normal y 15% vigor raquítico. El crecimiento de *T. grandis* L. f. en la plantación evaluada es menor con respecto al crecimiento reportado en otras regiones; probablemente se ve afectado por el poco manejo que se aplica en la plantación ya que a altas densidades se ve afectado el crecimiento en diámetro y altura y por consecuente el crecimiento en volumen.

Palabras clave: Inventario, sitio, manejo forestal.

ABSTRACT

The objective was to evaluate the growth of a commercial planting of *Tectona grandis* L. f. established in Nuevo Urecho, Michoacan. The plantation was established in July 2003 in an area of 3 ha; circular sampling sites within 8.92 m and 250 m² area, information was taken at 6 sites forming 1,500 m² corresponding to a sampling intensity 5%. one measurement was made, at 7 and 11 years of being established; measurements of quantitative variables; stump diameter of 30 cm of soil, normal diameter (DBH), total height, crown diameter; were conducted with diameter tape, measuring tape and dendrometro Criterion® RD1000; qualitative variables were evaluated; plant health, vigor, shaft and silvicultural class. Based on inventories raised; diameter at breast height, presents values of 14.72 and 16.01 cm average; stump diameter presented averages 18.40 and 19.16 cm; basal area (m²) shows 0.0106 and 0.0205 m² per site; Woodland overall height is 10.96 to 12.76 m; the volume (m³)/site at 7 years has 2.56m³ and 3.54m³ at age 11. plant health; 95% healthy and 5% sick; silvicultural class with dominant 61% woodland, 22% and 16% codominant deleted; Woodland force 85% normal and 15% rickety force. The growth of *T. grandis* L. f. in the plantation is evaluated lower against the growth reported in other regions; probably affected by the bit operation which is applied as planting at high densities is affected growth in diameter and height and consequent volume growth.

Keywords: Inventory, site, forest management.

INTRODUCCIÓN

Una plantación forestal comercial es el establecimiento y manejo de especies forestales en terrenos de uso agropecuario o terrenos que han perdido su vegetación forestal natural, con el objeto de producir materias primas maderables y no maderables, para su industrialización y/o comercialización (CONAFOR, 2014). En México existen aproximadamente 22 millones de hectáreas aptas para desarrollar plantaciones forestales comerciales, de las cuales la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) ha definido 13.9 millones de hectáreas como prioritarias con calidad de suelos y climas favorables para obtener un crecimiento rápido, mano de obra disponible y un mercado interno que demanda más materias primas forestales cada día (CONAFOR, 2014).

En México, las plantaciones forestales comerciales cubren más de 118 000 ha (Velázquez, 2009); sin embargo, para las condiciones particulares del país, la información sobre el rendimiento y productividad de las diferentes especies utilizadas, entre ellas la teca (*Tectona grandis* L. f.), no es profusa. En consecuencia, es necesario generar mecanismos que permitan estimar lo anterior y apoyar el desarrollo de las técnicas para su cultivo. Para estimar la productividad de una plantación es necesario aplicar la medición forestal utilizando variables cuantitativas y cualitativas. La medición directa es un procedimiento sencillo que sólo requiere el conocimiento de ciertos instrumentos especiales que se usan para medir dimensiones accesibles.

La teca es una especie importante por el alto precio que alcanza su madera; la rapidez de su crecimiento es intermedia y se han propuesto turnos de 20 a 30 años, aunque la madera de árboles más jóvenes también tiene buena aceptación comercial (Camacho *et al.*, 2014). La teca ha ganado gran reputación a nivel mundial debido a la alta calidad por su atractivo y durabilidad, a que posee gran resistencia al ataque de hongos e insectos y, por sus excelentes características, se considera como una de las más valiosas del mundo (Fonseca, 2004).

OBJETIVO

Evaluar el crecimiento de la plantación comercial de *Tectona grandis* L. f. establecida en Nuevo Urecho, Michoacán.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del área de estudio

Localización

La plantación comercial de *T. grandis* se encuentra ubicada en el paraje “El Mirador”, municipio de Nuevo Urecho, Michoacán. Su delimitación geográfica está comprendida entre las coordenadas geográficas de latitud N 19°11'39.6" y longitud W 101°51'53.3", y una altitud promedio de 617 m (Figura 1).



Figura 1. Ubicación de la plantación comercial de *Tectona grandis* L. f., establecida en el paraje “El Mirador”, Nuevo Urecho, Michoacán.

Orografía

La región forma parte del Eje Neovolcánico Transversal; formado por los cerros: El Tipítaro, de las Gallinas, de Agua Fría y de las Cuevas (INAFED, 2009).

Hidrografía

La ubicación del área de estudio se localiza dentro de la cuenca hidrológica del Río Balsas, en la Región Hidrológica RH18 “Río Balsas” y Subcuenca del Río Cupatitzio y Microcuenca del Río Santa Bárbara. Cerca de la plantación se localizan escurrimientos permanentes de la Subcuenca del Río Cupatitzio. También está constituida por los ríos: Tepenahua, Santa Efigenia, Parota, Salado; Los Arroyos, El Coyol, Seco, Colimilla, Zapotes, San José, El Pinal; y manantiales de agua fría y uno termal (INEGI, 1985; INAFED, 2009).

Clima

La plantación comercial le corresponde un tipo de clima: Awo(w) cálido subhúmedo con lluvias en verano. Porcentaje de lluvia invernal menor de 5% del total anual. El menos húmedo con temperatura media anual que presenta el área, se encuentra entre los valores de 29°C con la máxima y la mínima registrada de 32 °C, y 18 °C. El promedio anual de la precipitación se estima alrededor 1,000 mm, entre los meses de junio hasta septiembre (DETENAL, 1979; INEGI, 1985; Anguiano *et al.*, 2003).

Suelo

La plantación sustenta el tipo de suelo Vertisol pélico, son suelos de color negro a gris oscuro, que se caracteriza por presentar grietas anchas y profundas en la época de sequía. Son suelos muy arcillosos y su utilización en agricultura es muy extensa, variada y productiva. Estos suelos son en general fértiles, pero presentan ciertos problemas para su manejo, ya que su dureza dificulta la labranza y con frecuencia presentan problemas de anegamiento por mal drenaje (DETENAL, 1979).

Topografía

El área de la plantación presenta un terreno plano y una pendiente de 1 al 2%.

Vegetación

El tipo de vegetación que forma parte de la plantación en estudio, es Selva Baja Caducifolia, y está representada por diversas especies que conforman los siguientes estratos:

Estrato arbóreo: *Enterolobium cyclocarpum* Jacq., *Ficus galucescens*, *Swietenia humilis* Zucc., *Andira inermis* (Swant) H. B. K. y *Tabebuia rosae*, *Ceiba pentrandra* L.) Gaertn., *Lysiloma acapulcensis* (Kunth) Benth.

Estrato arbustivo: *Pithecellobium dulce* (Roxb.) Benth., *Acacia farnesiana* (L.) Willd., *Ricinus cummunis* L., *Guazuma hulmifolia* Lam., *Crotón morifolius* Willd., *Bursera spp.*, *Ipomea arborescens* (Humb. & Bonpl. ex Willd.) G.Don.

Estrato herbáceo: *Pennisetum ciliare* (L.) Link; *Setaria parviflora* (Poir.) Kerguélen, *Rhynchelytrum repens* (Willd.) C. E. Hubb. *Sporobolus indicus* (L.) R. Br., *Cyperus esculentus* L., *Virens Michaux*, *Bouteloua gracilis* (HBK.) Lag (Martínez, 1979).

Descripción de *Tectona grandis* L. f.

Clasificación taxonómica de *Tectona grandis* L. f.

Familia: Verbenaceae

Género: *Tectona*

Especie: *grandis*

Nombre científico: *Tectona grandis* L. f.

Nombre común: Teca

Descripción botánica de *Tectona grandis* L. f.

Es un árbol deciduo de 20 a 30 m que llega a alcanzar los 50 m de altura; fustes rectos, con diámetros de 0.10 m hasta 2.5 m. Tronco recto, especialmente cuando es joven, con la tendencia a bifurcarse o ramificarse en exceso si crece aislado. La copa es abanicada; ramillas gruesas, cuadrangulares gris claro o

verdosas. Las ramas de esta especie en la etapa adulta son muy gruesas (Fonseca, 2004).

Corteza

La corteza es de color café grisáceo o castaño claro, escamosa y presenta grietas superficiales; la corteza viva es blanquecina (Flinta, 1960; Niembro, 1986; Chávez y Fonseca, 1991).

Hojas

Las hojas son simples opuestas, caducas, muy grandes, sésiles o cortopetioladas, elípticas de 40-60 cm de largo por 25-30 cm de ancho, coriáceas, ásperas, ápice y base agudos, oscuras por el haz, amarillentas y con nervaduras prominentes por el envés, dejando cicatrices muy marcadas al caer (Flinta, 1960; Niembro, 1986; Chávez y Fonseca, 1991).

Inflorescencia

La inflorescencia se presenta en panículas terminales de 0.40 m hasta 1.0 m de largo. Flores de cáliz campanulado, color amarillo verdoso, de borde dentado, los pétalos se juntan formando un tubo corto, 5 o 6 estambres insertados debajo del tubo de la corola, anteras amarillas, ovadas y oblongas (Chávez y Fonseca, 1991).

Flores

Las flores son pequeñas y actinomorfas, bisexuales, inconspicuas en inflorescencias de color lila y dispuestas en grandes panículas terminales, erectas y ramificadas, cáliz gris con 6 lóbulos campanulados, corola con 6 lóbulos extendidos con estambres epipétalos, ovario de 4 celdas, estilo delgado, estigma bilocular (Chávez y Fonseca, 1991).

Fruto

El fruto es una drupa de color castaño claro cuando madura, es subgloboso, más o menos tetragono, aplanado; exocarpo delgado, algo carnosos cuando

fresco y tomentoso; endocarpo grueso, óseo, corrugado con cuatro celdas que encierran 1 o 2 semillas de 5 mm de largo (Chávez y Fonseca 1991).

Origen y distribución.

T. grandis es originaria de la India, Birmania, Tailandia, Java e Indonesia (Niembro, 1986; Peña, 1984). En su lugar de origen se distribuye en el Bosque tropical caducifolio y Bosque tropical seco (Flinta, 1960). No obstante ha sido plantada en las Filipinas, África, Guayana Británica, Puerto Rico, Cuba, Haití, Jamaica, Trinidad, Honduras, Camboya, Laos, Vietnam (Norte y Sur) y en América Latina (Longwood, 1962 y Kukachka, 1970).

Clima

Esta especie prospera en climas cálido-húmedos con temperatura media de 21 a 28 °C, una mínima de 17 a 21.3 y máxima entre 30.2 a 46° C, marcada en una estación seca de tres a cinco meses con un máximo de 60 mm de lluvia. Los lugares cuyas condiciones son muy secas usualmente producen un crecimiento atrofiado. En los sitios donde no se presenta ésta marcada estación seca, se puede obtener un crecimiento más rápido, pero también producen una madera con una sabia más espesa y una calidad general más baja, lo que incluye una densidad promedio menor, un color menos atractivo, una textura inferior y una madera menos fuerte (Von Carlowitz *et al.*, 1991; Lamprecht, 1989; Monroy, 1998).

Suelo

T. grandis crece a partir del nivel del mar hasta 1,200 m de altitud. Se establece sobre una variedad de suelos y formaciones geológicas (Seth, 1958; Seth, 1959), el mejor crecimiento ocurre en suelos aluviales profundos, porosos, fértiles y bien drenados, con un pH neutral o ácido (Chaves, 1991; Kadambi, 1972; Salazar, 1974; Watterson, 1971). Tolerancia condiciones de suelo muy extremas, siempre que exista un drenaje adecuado (Ross, 1959).

Producción de la planta

Las plantas para el establecimiento de la plantación se propagaron en el vivero del rancho “La Guadalupe” del municipio de Nuevo Urecho, Michoacán. La semilla de *T. grandis* tiene procedencia de Costa Rica. La germinación de la semilla se llevó a cabo en almácigo, cuando las plántulas alcanzaron una altura aproximada de 8 a 10 cm, se realizó el trasplante a bolsas de polietileno negro de 10 x 15 cm; posteriormente se colocaron en platabandas. El substrato utilizado en el vivero fue una mezcla de 70% de tierra vertisol y 30% de topure.

Establecimiento de la plantación

La plantación comercial se estableció en julio del 2003, en una superficie aproximada de 3 ha. Se utilizaron plantas de 6 meses de edad con una altura promedio de 35 a 45 cm. El diseño de plantación fue “Marco real” y se utilizó el sistema plantación de “Cepa común”, con dimensiones de 30 x 30 x 30 cm. Además a las plantas se les colocaron tutores para darles un mejor soporte.

Espaciamiento y densidad de plantación

Se estableció bajo un diseño de marco real, donde el espaciamiento entre árboles fue de 2.0 x 3.0 m, que corresponde a una densidad de 1,666 árboles/ha. Es decir a 4,998 árboles en 3 ha.

Aplicación de riegos de auxilio

A partir del establecimiento de la plantación, así como durante los primeros meses (febrero a mayo) que es la época de estiaje, se aplicó riego rodado cada 15 días. Posteriormente cada año durante este periodo se continuó con los riegos de auxilio.

Mantenimiento de la plantación y labores culturales

El mantenimiento de la plantación consistió en el cuidado de la plantación y chaponeo de malezas durante los primeros meses de su establecimiento.

Medidas de protección

La plantación comercial, cuenta con un cercado de postes y con 3 hilos de alambre de púas, con la finalidad de protegerla del ganado.

Tipo e intensidad de muestreo

El tipo de muestreo utilizado fue el sistemático. Los sitios de muestreo fueron circulares con un radio de 8.92 m y área de 250 m². Se tomó la información en 6 sitios que en total forman 1,500 m² que corresponden a una intensidad de muestreo del 5 %.

Toma de datos

Se elaboró un formato expreso que contiene datos generales, variables cuantitativas y cualitativas. Durante la toma de datos de campo se realizó una sola medición, a los 7 (Alvarado, 2010) y 11 años de haberse establecido la plantación comercial. Dentro de la plantación comercial y en cada sitio de muestreo se eligió un árbol para tomarlo como el centro, la delimitación se realizó con la ayuda de un cable de 8.92 m, y utilizando listones de colores se marcaron los límites para evitar confusiones entre los árboles que caen dentro del sitio.

En el árbol que quedó en el centro del sitio, se marcó la corteza con un anillo por arriba del 1.30 m con pintura naranja; posteriormente se numeraron los árboles que quedaron dentro del sitio, empezando por los orientados hacia el Norte y siguiendo la dirección de las manecillas del reloj.

Variables cuantitativas

Para la evaluación de la plantación comercial se procedió a las mediciones de las variables cuantitativas con cinta diamétrica, flexómetro y el dendrómetro Criterion® RD1000: Supervivencia, diámetro de tocón a 30 cm del suelo, diámetro normal (DAP), altura total, diámetro de copa y las variables cualitativas: Estado fitosanitario, vigor, fuste y clase silvícola. A cada variable se

le asignó una clave previa, con el fin de identificarla con mayor facilidad durante la toma de datos.

Supervivencia

Se tomó en cuenta el número de árboles vivos, muertos en pie y desaparecidos (aquellos que no se encontraban en el sitio y fueron muertos o retirados). Los árboles desaparecidos fueron incluidos en la categoría de árboles muertos. El porcentaje de árboles vivos y muertos se obtuvo con la relación de árboles vivos y muertos y divididos entre el total del arbolado que entraron en cada sitio (Romahn, 1994; Forte, 2005).

Medición de diámetro de tocón

La medición de diámetro de tocón se realizó a una altura de 30 cm de la base del árbol, con la ayuda una cinta diamétrica, en cada uno de los individuos que entraron dentro del sitio de muestreo.

Medición de diámetro normal (DAP)

La medición del diámetro se realizó a una altura, a 1.30 m (DAP). Debido a que la plantación está situada en un lugar plano, las mediciones se pueden efectuar desde cualquier ángulo. Cuando los terrenos tienen pendiente la lectura puede tomarse colocándose arriba de la pendiente o transversal a la misma (Romahn, 1994; Forte, 2005).

Medición de la altura total

A cada individuo que entró en los sitios de muestreo se le midió directamente la altura, la cual se refiere a la medida vertical del árbol desde la base hasta la punta de la copa. El equipo utilizado fue el dendrómetro Criterion® RD1000.

Medición de diámetro copa

Se midió la proyección de las copas de los árboles considerando los cuatro puntos cardinales (N, S, E, y W), para este caso se utilizó un flexómetro de 5 m de longitud. La medición se realizó a partir del centro del fuste hacia la línea

vertical donde termina el follaje principal de la copa, y posteriormente se calculó el área de copa mediante la fórmula de la elipse (Forte, 2005).

Variables cualitativas

Evaluación del fuste

Se evaluó mediante la observación y se definió como fuste recto a aquel que mantiene la vertical y no se observó ladeado en ninguna orientación; como fuste inclinado se consideraron los árboles cuyos tallos se encontraron inclinados en cualquier orientación.

Daños mecánicos

En esta variable se determinó si el arbolado de la plantación comercial presentaba daños mecánicos, por ejemplo, aquellos causados por el hombre o de manera natural por rayos, huracanes, animales e incendios. Y la ubicación del daño y puede ser en el fuste, las ramas, corteza, follaje, además de manera subjetiva se identificó el grado del daño como leve, medio y severo, según se pueda apreciar en la totalidad del arbolado o en forma parcial (Forte, 2005).

Vigor del arbolado

En este concepto se calificó al arbolado en tres niveles de vigor identificados como exuberante, normal y raquíuticos (Forte, 2005). Se refiere a las características fenotípicas del árbol, desde la base hasta la copa; se tomó en cuenta el diámetro, altura, fuste, copa, sanidad, color de las hojas y se clasificaron en:

- a) Vigor exuberante: Es aquel en el cual el árbol tiene una altura superior a los demás, el diámetro es más grande y tiene una buena conformación.
- b) Vigor normal: Es aquel que tiene características comunes a la mayoría del arbolado, tanto en crecimiento en altura como en diámetro y porte.
- c) Vigor raquíutico: Es aquel que creció suprimido o su desarrollo fue muy inferior a los demás, el cual puede estar próximo a morir.

Estado fitosanitario

Para efectuar la evaluación del estado fitosanitario de la plantación solo se manejaron dos conceptos que son sanos o enfermos. Si el árbol en ese momento se encontró enfermo se determinó cual fue el agente causal, que pudo ser barrenador de brotes y yemas, fungosis en el tallo, ramas o en la base, descortezador, defoliador, muérdago, bacterias o virosis, y finalmente si no se conoce el agente causal se tiene la opción de colocarlo como desconocido (Forte, 2005).

Evaluación de la clase silvícola

Esta se consideró en base a la cantidad de luz que recibe el árbol en relación con el resto de la población del sitio. Se clasificaron de la siguiente manera:

- a) Árboles dominantes: Sus doseles están por encima de los doseles de los árboles vecinos, sobresaliendo un poco del resto. El 80% o más de su dosel están totalmente expuestos al sol.
- b) Árboles codominantes: Sus copas se entremezclan con muchas otras, con el 50-80% de su dosel completamente expuesto al sol.
- c) Árboles intermedios: La mayoría de sus copas están por debajo de la altura de otros del grupo, y reciben el 20-50% de sol.
- d) Árboles suprimidos: La altura de sus doseles es totalmente inferior a la de todos los otros árboles, y reciben escasa luz solar directa (Musálem y Fierros, 1996).

Análisis y procesamiento de datos

Para la obtención de promedios y gráficas se utilizó un manejador de bases de datos (Excel) con el cual se obtuvieron porcentajes de supervivencia y promedios de diámetros, alturas, área de copa y volumen. Estos datos se utilizaron para calcular la estadística básica (medias, varianza, desviación estándar,) de las variables de la especie. Se estimó y graficó el porcentaje del

tipo de vigor, fuste, clase silvícola, y estado fitosanitario. Con los valores anteriores se procedió a realizar una prueba de “t” para medir el grado de significancia entre las variables evaluadas.

Para el cálculo del área basal se utilizó la fórmula siguiente:

$$g = \left(\frac{\pi}{4}\right) * d^2 \quad (1)$$

Dónde: g =Área basal m^2

d^2 =Diámetro en cm

Para el cálculo del volumen se utilizó la fórmula siguiente:

$$V = D^2 * h * 0.7854 * 0.6 \text{ (Muñoz et al., 2011)} \quad (2)$$

Dónde: V =Volumen m^3

D =Diámetro en cm

h =Altura en m

0.6 =Coeficiente mórfico

Y para el cálculo del área de copa se utilizó la fórmula de la elipse:

$$A = D_1 * D_2 * 0.7854 \quad (3)$$

Dónde: A =Área de copa

D_1 =Diámetro medido de Norte a Sur

D_2 =Diámetro medido de Este a Oeste

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Variables cuantitativas

En base a los inventarios levantados de la plantación forestal comercial de *T. grandis* a la edad de 7 y 11 años (Figura 2) se muestra el comportamiento en cuanto al Diámetro a la altura del pecho (cm), presenta valores de 14.72 y 16.01 cm promedio a la edad de 7 y 11 años. De acuerdo a los resultados de la prueba de “*t*” se observa que no hay diferencia significativa, ya que para las edades de medición evaluadas se obtuvo un valor de $p=0.0986$. Camino y Morales (2013) plantean escenarios de crecimiento de plantaciones de teca (Conservador, Promedio y Optimista) y consideran la realización de tres raleos a los 4, 8 y 12 años. El modelo conservador presenta que a la edad de 7 años con 600 arb/ha se tiene un diámetro de 16.4 cm y a la edad de 11 años con 400 arb/ha presentan diámetros de 23.3 cm; los resultados obtenidos en la plantación evaluada difieren con el modelo conservador; probablemente a que no se han realizado raleos en la misma. Estos datos indican que la teca tiene una relación de esbeltez alta (muchacha altura en relación con el diámetro), así como una alta afectación del crecimiento en diámetro por altas densidades de la plantación.

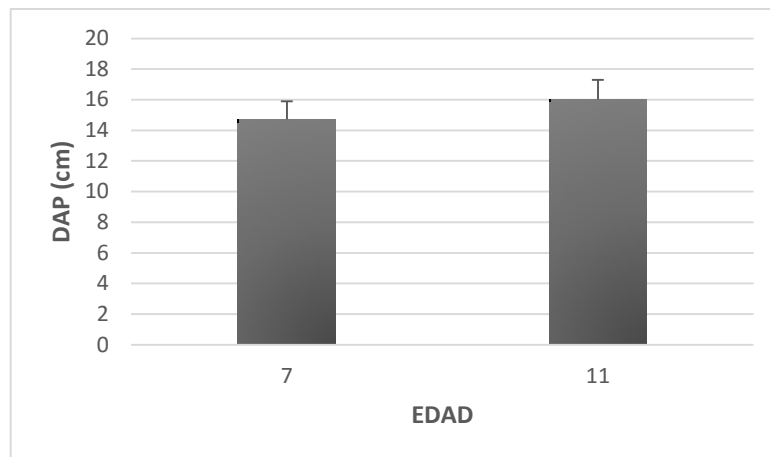


Figura 2. Dinámica del DAP de árboles de *T. grandis* a través del tiempo.

La variable diámetro de tocón presento valores promedios a la edad de 7 años de 18.40 cm y a la edad de 11 años, 19.16 cm. Una vez realizada la prueba de “t” para esta variable se presenta un valor de $p=0.3493$; por lo que se demuestra que no hay diferencia significativa con respecto al crecimiento del diámetro del tocón en las dos mediciones realizadas en la plantación; como se muestra en la figura 3.

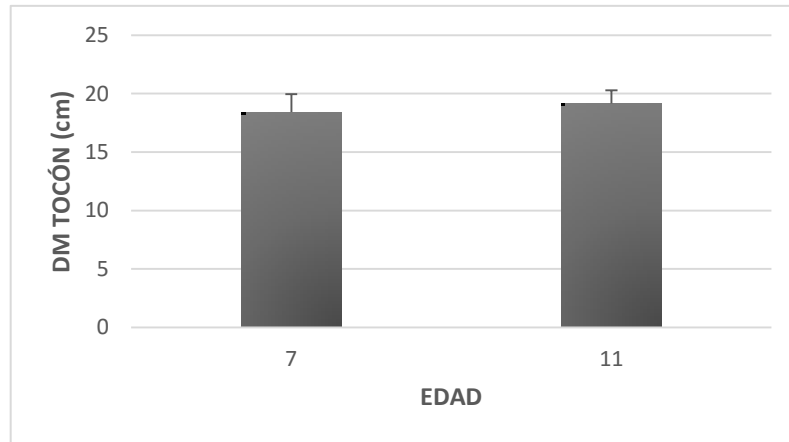


Figura 3. Se muestra el comportamiento de árboles de *T. grandis* en cuanto al Diámetro de Tocón (cm).

Con respecto al Área Basal (m^2) la plantación muestra 0.0106 y 0.0205 m^2 promedio por sitio para las edades de 7 y 11 años como se muestra en la figura 4. Los resultados de la prueba de “t” para esta variable muestra diferencia significativa con un valor de $p=9.808e^{-05}$ en las dos edades realizadas las mediciones.

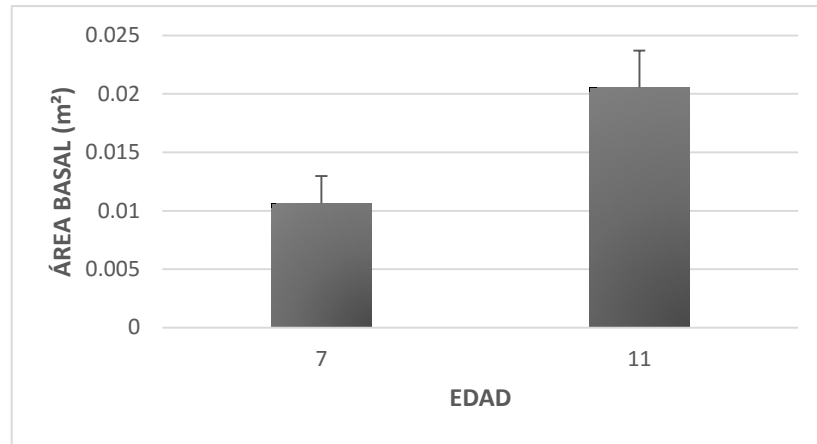


Figura 4. Dinámica en Área Basal de árboles de *T. grandis* a través del tiempo.

El crecimiento de los árboles de *T. grandis* es bastante rápido durante los primeros años, principalmente en altura (en promedio 2 m/año), luego va disminuyendo y pasados los 50 años es muy lento (CONIF 2002). La Altura total (m) del arbolado en la plantación va de 10.96 a 12.76 m a la edad de 7 y 11 años respectivamente (Figura 5); por lo que coincide con Martínez (1981), citado por CONIF (2002), menciona que el crecimiento inicial en altura hasta los cinco años es de 3-5 m/año en los mejores sitios y luego de los cinco años, el crecimiento rara vez excede los 2 m/año. De acuerdo con Camino y Morales (2013) en el escenario de crecimiento conservador para teca proponen a la edad de 7 años con 600 arb/ha una altura dominante de 16.5 m y a la edad de 11 años con 400 arb/ha una altura de 23.6 m; los valores obtenidos por la plantación en estudio son menores a los propuestos en los modelos consultados. El resultado del valor de $p=0.01575$, muestra diferencia significativa con respecto a la altura total del arbolado en las mediciones a diferentes edades.

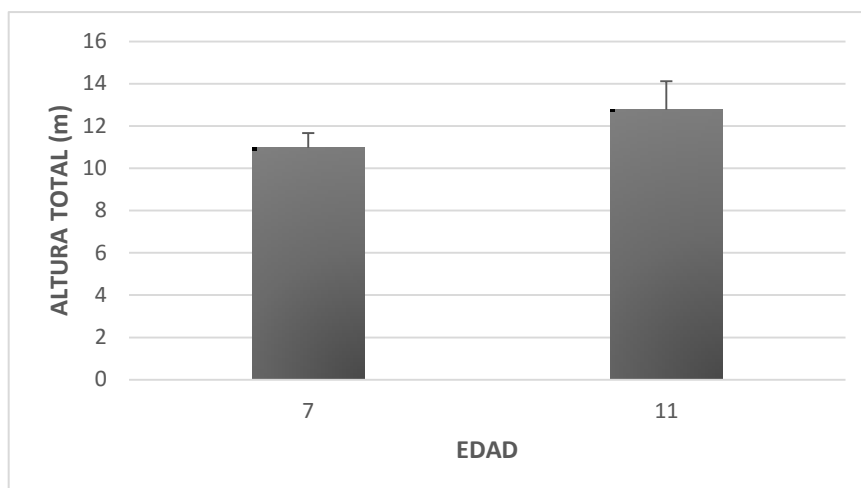


Figura 5. Dinámica en Altura de árboles de *T. grandis* a través del tiempo.

Cuando se hace referencia al crecimiento en volumen en plantaciones forestales, la expresión se refiere al volumen del fuste (y no al volumen total del árbol, incluyendo raíces, ramas y follaje); por lo tanto, este crecimiento en volumen es una consecuencia directa del crecimiento en altura y en diámetro; el incremento en altura y en volumen se desacelera sustancialmente después de aproximadamente 15 a 20 años (Camino y Morales, 2013); en cuanto a los escenarios estudiados muestran un volumen de $74.8\text{m}^3/\text{ha}$ a la edad de 7 años con 600 arb/ha y $145.2\text{m}^3/\text{ha}$ a los 11 años de edad con una densidad de 400 arb/ha; con respecto a la plantación evaluada a la edad de 7 ésta presentó un volumen de $102.4\text{m}^3/\text{ha}$ el cual es mayor al obtenido en el modelo consultado y a los 11 años $141.6\text{m}^3/\text{ha}$ de volumen siendo menor a lo señalado dentro de los escenarios. En la figura 6 se muestra el Volumen (m^3)/Sitio a la edad de 7 años con 2.56m^3 y a los 11 años 3.54m^3 por sitio. Una vez realizada la prueba de “t” para esta variable, el resultado muestra diferencia significativa del volumen con respecto a las dos edades de evaluación en la plantación, con un valor de $p=0.05201$ como se muestra en la figura 6.

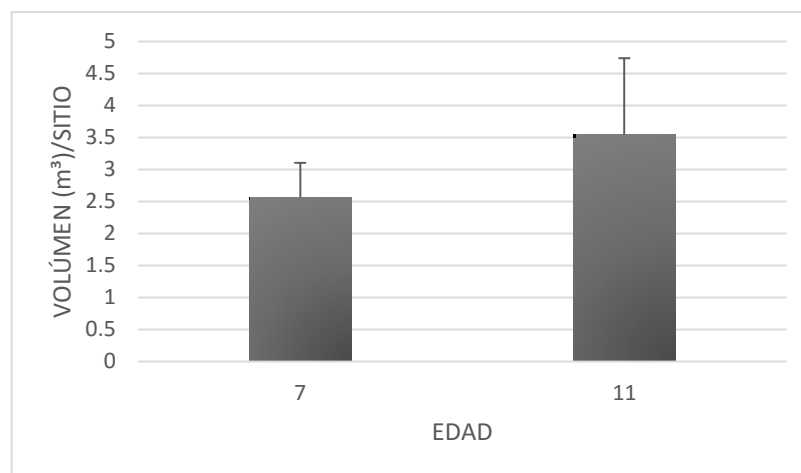


Figura 6. Dinámica en Volumen (m³)/Sitio de árboles de *T. grandis* a través del tiempo.

Variables Cualitativas

El estado fitosanitario que presenta la plantación es sano con 95%, y 5% enfermo, del arbolado a la edad de 11 años; con un grado de infestación leve de muérdago (*Psittacanthus calyculatus*) (Figura 7).

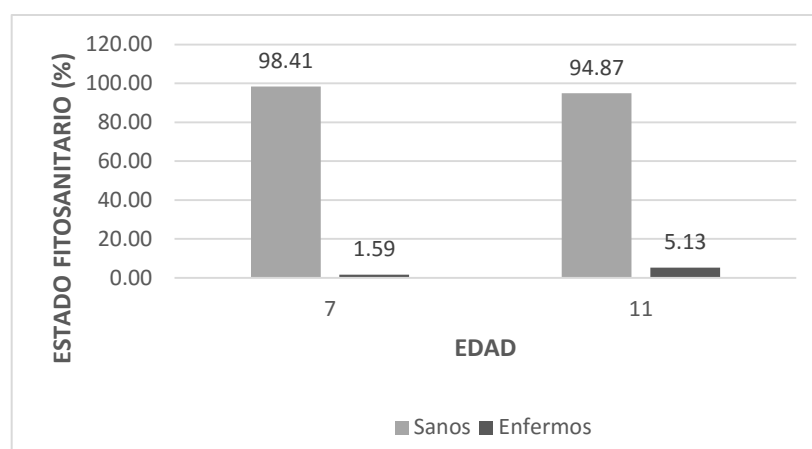


Figura 7. Se muestra el Estado Fitosanitario (%) de árboles de *T. grandis*.

En relación a la clase silvícola, para las dos edades evaluadas los resultados mostraron a la edad de 7 años el arbolado era codominante con un 67%, suprimido con 25% y 9% de arbolado dominante; evaluada a los 11 años la plantación el arbolado muestra cambios en la clase silvícola en que se han clasificado; con un 61% el arbolado es dominante, 22% codominante y 16% suprimido (Figura 8).

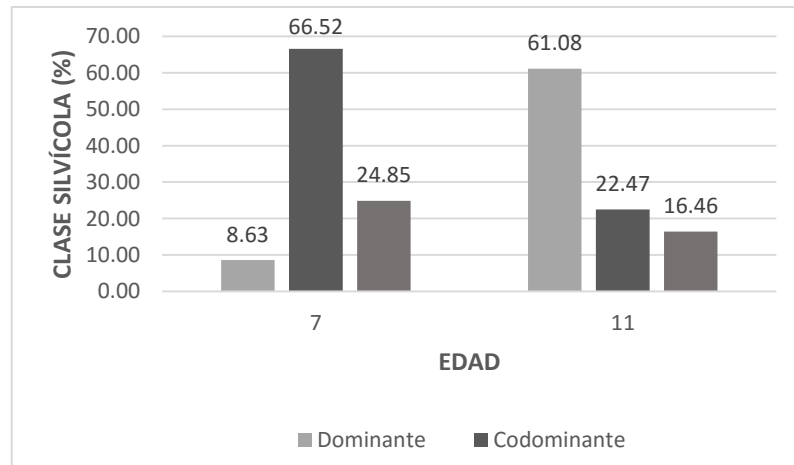


Figura 8. Se muestra la Clase Silvícola (%) de árboles de *T. grandis*.

El vigor de la plantación de *T. grandis* presentó un promedio de 90 % de vigor normal y 10% de vigor raquítico, a la edad de 7 años y para la edad de 11 años 85% de vigor normal, mientras que 15% presenta un vigor raquítico (Figura 9).

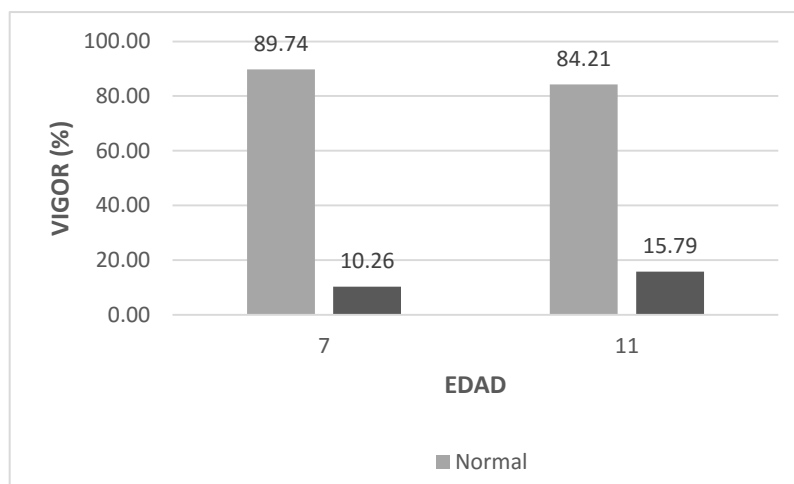


Figura 9. Se muestra el Vigor (%) de árboles de *T. grandis*.

CONCLUSIONES

El crecimiento de *T. grandis* L. f. (Altura, Diámetro Normal, Área Basal y Volumen) en la plantación comercial de Nuevo Urecho, Michoacán es menor con respecto al crecimiento reportado en otras regiones.

Este comportamiento del crecimiento probablemente se ve afectado por el poco manejo que se aplica en la plantación (espaciamiento inicial, aclareos, control de malezas, fertilización y podas).

Altas densidades de la plantación afectan el crecimiento en diámetro y altura y por consecuente el crecimiento en volumen.

REFERENCIAS

Alvarado, C. J. 2010. Evaluación de una plantación comercial de teca (*Tectona grandis* L. f.) establecida en el municipio de Nuevo Urecho, Michoacán. Tesis profesional. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Facultad de Agrobiología "Presidente Juárez". Uruapan Michoacán. 72. Diciembre 2010.

Camacho-Linton, A., Ramírez-Maldonado, H., de los Santos-Posadas, H. M., y Zamudio Sánchez, F. J. 2014. Tablas de rendimiento para teca (*Tectona grandis* L.) en el estado de Campeche. Revista Mexicana de Ciencias Forestales, 4(19), 92-101.

Camino, R. D., & Morales, J. P. 2013. Las plantaciones de teca en América Latina: mitos y realidades. Turrialba: CATIE.

Chaves E. y Fonseca W. 1991. Teca, *Tectona grandis* L. f., especie de árbol de uso múltiple en América Central. Informe Técnico 179. Turrialba, Costa Rica: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. 47 p.

Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). 2014. <http://www.conafor.gob.mx/portal/index.php/temas-forestales/plantaciones>. (Consultada: 09 de octubre de 2014.).

DETENAL, Dirección de Estudios del Territorio Nacional. 1979. Descripción de la leyenda de la carta edafológica. México. p: 87-89.

Flinta, C.M. 1960. Prácticas de plantación forestal en América Latina. FAO. Cuadernos de fomento forestal No. 15. Roma. 129-129 p.

Fonseca, W. 2004. Manual para productores de teca (*Tectona grandis* L.) en Costa Rica. Heredia. Costa Rica.

INAFED, Instituto para el Federalismo y el Desarrollo Municipal. 2010. Michoacán de Ocampo. Disponible en:

<http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM16michoacan/index.html>
(Consultada: 24 de Febrero del 2016).

INEGI, Instituto Nacional de Estadística Geográfica e Informática. 1985. Síntesis Geográfica del Estado de Michoacán. Instituto Nacional de Estadística Geográfica e Informática. Secretaría de Programación y Presupuesto. México. D.F. 341 p.

Kadambi, K. 1972. Silviculture and management of teak. Bull. 24. Nacogdoches, TX: Stephen F. Austin State University, School of Forestry. 137 p.

Kukachka, B. F. 1970. Properties of Imported Tropical Woods. Forest. Products. Laboratory. Madison, Wisconsin, U.S.A. FPL-125. 66 p.

Longwood, F.R. 1962. Present and Potencial Comercial Timbers of the Caribbean. Agriculture Handbook No. 207. Washington, U.S. A. 167 p.

Martinez, M. 1979. Catálogo de nombres vulgares y científicos. Plantas mexicanas. Fondo Cultura Económica (F.C.C.). México D.F. 1220 p.

Monroy, R. C. 1998. Establezca plantaciones forestales en el trópico utilice especies de alto valor comercial o de rápido crecimiento. In: 500 Tecnologías Llave en Mano. División Forestal. INIFAP: SAGAR. pp. 175-177.

Muñoz F. H.J., Orozco G.G., Sáenz R.J.T., Rueda S.A., y Prieto J.A.R. 2011. Evaluación de plantaciones forestales comerciales tropicales en el estado de Colima y Michoacán. Folleto Técnico Núm. 25. SAGARPA. INIFAP. CIRPAC. Campo Experimental Uruapan, Michoacán, México. 71 p.

Musálem M.A y Fierros A.M. 1996. Apuntes del curso silvicultura de bosques naturales. Universidad Autónoma de Chapingo. División de ciencias forestales. Chapingo, México. 119 p.

Niembro R., A. 1986. Árboles y arbustos útiles de México. Ed. Limusa. México D.F. 206 p.

- Peña, M. 1984. Guía Agropecuaria de Costa Rica. La teca (*Tectona grandis*) en Costa Rica. Ediciones Agropecuarias Ver. No. 9. San Juan Tibas, Costa Rica.
- Romahn de la V. C. F. 1994. Dendrometría. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Edo., de México, 354 p.
- Salazar F., Rodolfo; Abertin, Waldemar. 1974. Requerimientos edáficos y climaticos para *Tectona grandis*. Turrialba. 24(1): 66-71.
- Seth, S.K y Yadav, J.S.P. 1959. Teak soils. Indian Forester. 85(1): 2-16.
- Seth, S.K. y Waheed K. M.A. 1958. Regeneration of teak forests. Indian Forester. 84(8): 455-466.
- Velázquez M., A. 2009. Situación actual y perspectivas de las plantaciones forestales comerciales en México. Comisión Nacional Forestal- Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco, Edo. de Méx., México. 472 p.
- Watterson, K.G. 1971. Growth of teak under different edaphic conditions in Lancetilla Valley, Honduras. Turrialba. 21(2): 222-225.

CAPÍTULO II. AJUSTE Y SELECCIÓN DE MODELOS MATEMÁTICOS PARA PREDECIR EL VOLUMEN TOTAL DEL FUSTE PARA *Tectona grandis* L. f. EN EL ESTADO DE MICOACÁN.

RESUMEN

El objetivo fue ajustar y seleccionar un modelo matemático para predecir volumen total del fuste para una plantación de teca (*Tectona grandis* L. f.) a los 11 años de establecida en Nuevo Urecho, Michoacán. La toma de datos se realizó, a los 11 años de edad en el año 2014, utilizando muestreo sistemático en seis sitios permanentes circulares; la muestra analizada consistió en 128 árboles; efectuándose mediciones a cada árbol. Se calculó el volumen de cada árbol muestreado; se seleccionaron para su evaluación seis modelos de volumen total. La estimación de los parámetros en el ajuste de los modelos se llevó a cabo con métodos iterativos, con el procedimiento Proc Model y el algoritmo Gauss-Newton del paquete estadístico SAS 9.2®, se empleó el método de ajuste de Mínimos Cuadrados Ordinarios (MCO). Se eligió el modelo de Meyer, que en orden de calificación presenta la más baja y los mejores criterios de bondad de ajuste con respecto a los otros modelos, presenta un valor del coeficiente de determinación ajustado (R^2_{adj})= 0.8246, el cual explica arriba de 82% la variabilidad total presente en la variable dependiente; sesgo absoluto= -0.0053 que indica que se tiene la mínima desviación del modelo con respecto a los valores observados, un valor de RECM= 0.0179, menor valor de SCE= 0.0399 y una alta significancia en cada uno de sus parámetros. Los modelos matemáticos permiten predecir en forma confiable el volumen de madera en árboles de manera flexible. Se recomienda el uso del modelo de Meyer para la predicción del volumen total del fuste en función del diámetro normal y la altura total para *Tectona grandis* L. f. en plantaciones del estado de Michoacán.

Palabras clave: Plantación comercial, medición, diámetro normal, altura total.

ABSTRACT

The aim was to adjust and select a mathematical model to predict total volume of the shaft for a teak plantation (*Tectona grandis* L. f.) at 11 years established in Nuevo Urecho, Michoacan. The data collection was carried out at 11 years old in 2014, using systematic sampling in six circular permanent sites; the analyzed sample consisted of 128 trees; measurements being performed each tree. The volume of each sampled tree was calculated; they were selected for evaluation six models of total volume. The estimation of the parameters in the fit of the models was performed with iterative methods, with the procedure Proc Model and the Gauss-Newton algorithm statistical package SAS 9.2®, the setting method of Ordinary Least Squares (OLS). It was used model Meyer, in qualifying order has the lowest and best criteria for goodness of fit with respect to the other models was chosen, it has a value of adjusted coefficient of determination (R^2_{adj}) = 0.8246, which explains above 82% the total variability present in the dependent variable; absolute bias= -0.0053 indicating that it has the minimum deviation of the model with respect to the observed values, a value of RMSE= 0.0179, lower value of SCE= 0.0399 and a high significance in each of its parameters. Mathematical models predict reliably the volume of wood in trees flexibly. The use of the Meyer model for predicting the total volume of the shaft according to the normal diameter and total height for *Tectona grandis* L. f is recommended in plantations of the state of Michoacan.

Keywords: commercial plantation, measuring, normal diameter, total height.

INTRODUCCIÓN

Los modelos alométricos son modelos matemáticos que permiten estimar una determinada variable, en función de otras variables; básicamente, el diámetro a la altura de pecho y la altura (Vallejo y Avendaño, 2013). La definición de modelos alométricos para una especie reduce la cantidad de trabajo y esfuerzo requeridos para cuantificar ciertas variables y permite la estimación de otras que serían de difícil y costosa medición en campo, a partir de características de fácil medición. (Vallejo y Avendaño, 2013).

Una de las principales características de las plantaciones forestales que inciden en la decisión de manejo es el volumen de madera comercial (CATIE, 2013). Con el fin de evaluar el valor de las cosechas se necesita conocer los volúmenes de fustes a detalle por clase diamétricas (CATIE, 2013). Una especie forestal exótica importante para las plantaciones forestales comerciales en México es la teca (*Tectona grandis* L. f.), la cual se ha adaptado bien en regiones de los estados de Campeche, Chiapas, Tabasco, Veracruz, Michoacán y Nayarit (CONAFOR, 2013).

Los modelos de volumen para teca desarrollados por Pérez y Kanninen (2003) sirven como ejemplo de este tipo de enfoque de modelación, construyeron un modelo para el volumen total del tronco a partir del diámetro y la altura de los árboles como variables determinantes. El modelo permite predecir el volumen del tronco hasta un diámetro superior definido por el usuario. Con este sistema es posible predecir el volumen de madera en árboles de una manera flexible (Hynynen, 2011). En América Latina se han desarrollados modelos alométricos aplicables a la especie; éstos son utilizados con frecuencia en los inventarios forestales, junto con los modelos de crecimiento, como base para la estimación de las existencias en pie y para el manejo de plantaciones. En Costa Rica, Camacho y Madrigal (1997) ajustaron un modelo de volumen total en plantaciones con diámetros de 5-30 cm. En Colombia, Torres (2004), ajustó y seleccionó modelos para plantaciones de 12 años de edad y García *et al.*,

(1999) en Cuba, seleccionaron modelos para edades de 25 años. En México Tamarit *et al.*, (2014) elaboraron un sistema de cubicación de árbol individual para plantaciones de teca en el sureste mexicano, integrado por modelos de volumen total y comercial variable generados a partir de funciones segmentadas de ahusamiento. Camacho *et al.*, (2013) calcularon el volumen de árbol individual por medio de la ecuación de Pérez y Kanninen (2003) en plantaciones de teca en el estado de Campeche.

El presente documento ofrece información relativa a la predicción del volumen total del fuste para *T. grandis* L. f., utilizando datos provenientes de inventario realizado en el año 2014; la cual conforma una herramienta con la que se vale un silvicultor para conocer de manera más precisa las existencias reales de ésta especie en la toma de decisiones.

OBJETIVO

Ajustar y seleccionar un modelo matemático para predecir volumen total del fuste para una plantación de teca (*Tectona grandis* L. f.) a los 11 años de establecida en Nuevo Urecho, Michoacán.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de Estudio

El estudio se realizó en la plantación comercial de *Tectona grandis* L. f.; que se encuentra ubicada en el paraje “El Mirador”, municipio de Nuevo Urecho, Michoacán. La región forma parte del Eje Neovolcánico Transversal; formado por los cerros: El Tipítaro, de las Gallinas, de Agua Fría y de las Cuevas (INAFED, 2009). Su delimitación geográfica está comprendida entre las coordenadas geográficas de latitud N 19°11'39.6" y longitud W 101°51'53.3", y una altitud promedio de 617 m. El suelo es Vertisol pélico (Vp), de color negro a gris oscuro, que se caracteriza por presentar grietas anchas y profundas en la época de sequía (DETENAL, 1979). El clima es Awo(w) cálido subhúmedo con

lluvias en verano, temperatura media anual de 29°C y precipitación anual 1,000 mm (DETENAL, 1979; INEGI, 1985).

Datos dasométricos

La toma de datos de campo se realizó, a los 11 años de edad en el año 2014, utilizando muestreo sistemático en seis sitios permanentes circulares con un radio de 8.92 m y área de 250 m² que en total forman 1,500 m² que corresponden a una intensidad de muestreo del 5%.

En cada sitio de muestreo se eligió un árbol para tomarlo como el centro, la delimitación se realizó con la ayuda de un cable de 8.92 m, y utilizando listones de colores se marcaron los límites para evitar confusiones entre los árboles que caen dentro del sitio. En el árbol que quedó en el centro del sitio, se marcó la corteza con un anillo por arriba del 1.30 m con pintura naranja; posteriormente se numeraron los árboles que quedaron dentro del sitio, empezando por los orientados hacia el Norte y siguiendo la dirección de las manecillas del reloj.

La muestra analizada consistió en 128 árboles; efectuándose mediciones a cada árbol; los datos colectados fueron diámetros a 0.3 m sobre el nivel del suelo ($d_{0.3}$), diámetro a la altura del pecho ($d_{1.3}$) y los demás diámetros a cada dos metros ($d_2, d_4, d_6, d_8, d_{10}, d_{12}, d_{14}$) hasta la altura total (H) con el Dendrómetro Criterion® RD 1000. En la Tabla 1 se presentan las estadísticas básicas descriptivas de las variables analizadas de la muestra de árboles trabajada. Para la cubicación de trozas se formó secciones de dos metros de largo, con diámetro menor y mayor conocidos, con lo cual fue calculado el volumen por el método de Smalian (Ecuación 1) citado por Finger (1992).

$$V_i = \sum_{i=1}^n \frac{g_i + g_{i+1}}{2} \cdot L_i \quad (1)$$

Dónde: V_i = Volumen de las secciones intermediarias (m³);

g_i = Área basal en la i-ésima posición (m^2);

L_i = Largo de la sección en la i-ésima posición (2 metros).

Para la obtención del volumen total con corteza individual fue sumado el volumen de cada sección (Ecuación 2), más el volumen de cono (Ecuación 3) formado por la última sección.

$$V = V_0 + \sum_{i=1}^n V_i + V_c \quad (2)$$

Dónde: V = Volumen total con corteza (m^3);

V_0 = Volumen del tocón (m^3) hasta 0.3 metros desde el nivel del suelo, constituyendo el volumen del cilindro;

V_c = Volumen de la punta superior del árbol (m^3) calculado por la fórmula del cono, de largo igual a la sección considerada, donde:

$$V_c = g_n \cdot L_n \cdot \frac{1}{3} \quad (3)$$

Dónde: g_n = Área basal del cono (m^2);

L_n = Largo del cono (m): $\frac{1}{3}$ = constante utilizada para el volumen del cono.

Se calculó el volumen de cada árbol muestreado, previo a su procesamiento; la información de las variables y del volumen acumulado, fue inspeccionada en forma gráfica los comportamientos y tendencias (Figura 10) lo que permitió corregir y depurar la base de datos.

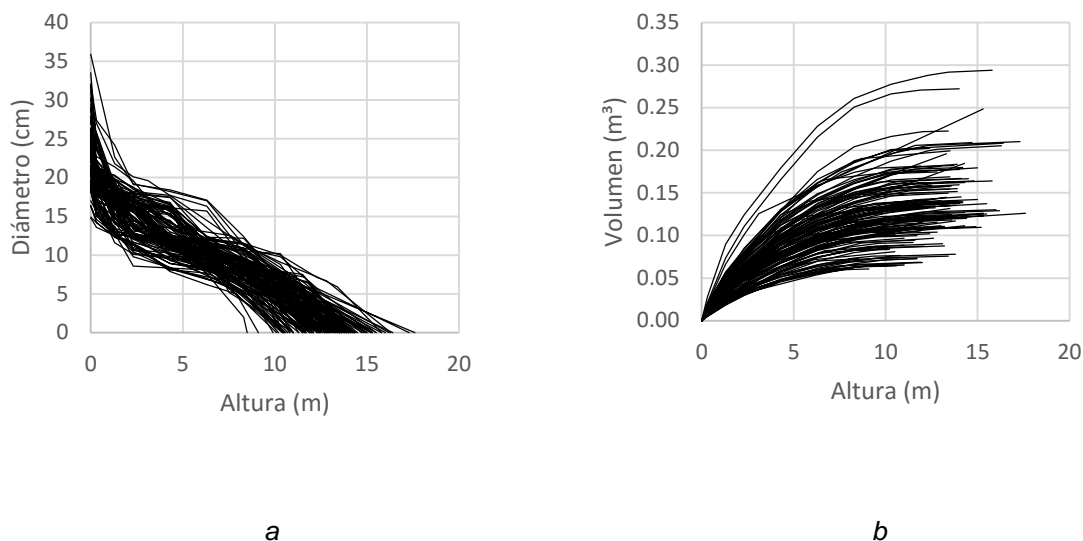


Figura 10. Comportamiento del diámetro (a) y del volumen acumulado con respecto a la altura sobre el fuste (b).

Tabla 1. Estadísticos de las variables medidas.

| Variable | Máximo | Medio | Mínimo | Desviación Estándar |
|----------------------|--------|-------|--------|---------------------|
| Diámetro tocón (cm) | 32.70 | 13.60 | 19.68 | 2.93 |
| Diámetro normal (cm) | 24.20 | 16.55 | 11.60 | 2.41 |
| Altura total (m) | 17.60 | 13.01 | 8.50 | 1.69 |

Modelos de volumen total

Es necesario verificar la forma de la línea o curva del conjunto de datos, mediante una gráfica de puntos (criterio sólido) o prediciendo el comportamiento teórico, según la experiencia en la utilización de los modelos, y de esa forma elegir la ecuación que represente la verdadera relación entre las variables (Husch, 1963).

Como el trazado de puntos es considerado un criterio fuerte en la elección de modelos cuando se conoce poco del tema, se optó por ésta, generando una gráfica de dispersión, que de manera singular permitió ver la tendencia de datos y el comportamiento de las variables independientes sobre la variable

dependiente (Figura 11). De este modo el modelo tendrá que predecir tal tendencia para facilitar su ajuste (Reyes, 2006).

El tipo de gráfica a que da lugar la relación de diámetro normal y volumen (Figura 11), es el de una curva parabólica o exponencial, cuya forma es cóncava hacia arriba. Es una forma de presentar los datos, con el fin de sustentar el uso de modelos lineales y no lineales.

De la elección del tipo de modelo dependerá la estimación precisa de la misma, ya que el método de mínimos cuadrados garantiza que la curva sea la mejor ajustada, pero esto no quiere decir que el modelo sea el apropiado (Reyes, 2006).

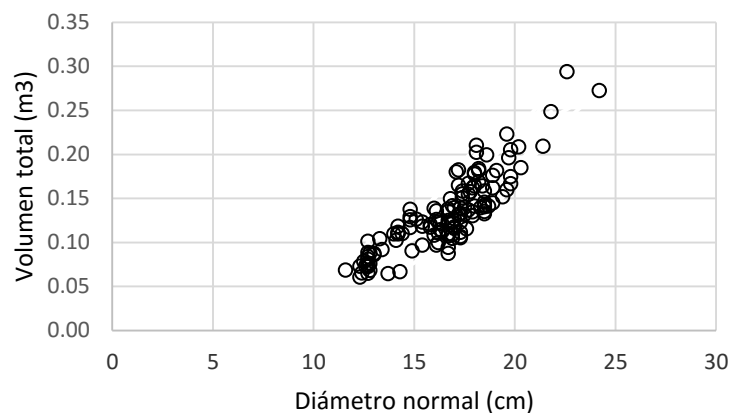


Figura 11. Dispersión de datos entre el volumen de fuste total y el diámetro normal.

En el estudio se seleccionaron para su evaluación seis modelos de volumen total (M1 a M6) (Tabla 2); la principal diferencia entre los modelos evaluados es el número de parámetros a ser estimados. La estimación de los parámetros en el ajuste de los modelos se llevó a cabo con métodos iterativos (Draper y Smith, 1988), con el procedimiento Proc Model y el algoritmo Gauss-Newton del paquete estadístico SAS 9.2® (SAS, 2010), se empleó el método de ajuste de Mínimos Cuadrados Ordinarios (MCO).

Tabla 2. Modelos matemáticos evaluados para la estimación del volumen total para *T. grandis* L. f. en Nuevo Urecho Michoacán.

| Variable Independiente | No. | Modelo | Expresión matemática |
|------------------------|-----|----------------------------|---|
| d, h | M1 | Australiana | $V = \beta_0 + \beta_1 \cdot d^2 + \beta_2 \cdot h + \beta_3 \cdot d^2 \cdot h$ |
| | M2 | Stoat (1945) | $V = \beta_0 + \beta_1 \cdot d^2 + \beta_2 \cdot d^3 + \beta_3 \cdot h + \beta_4/h + \varepsilon$ |
| | M3 | Meyer (1941) | $V = \beta_0 + \beta_1 \cdot d + \beta_2 \cdot d^2 + \beta_3 \cdot d \cdot h + \varepsilon$ |
| | M4 | Prodan <i>et al</i> (1997) | $V = \beta_0 + \beta_1 \cdot d^2 \cdot h + \beta_2 \cdot d^2 + \varepsilon$ |
| | M5 | Naslud (1936) | $V = \beta_1 + \beta_2 \cdot d^2 + \beta_3 \cdot d^2 \cdot H + \beta_4 \cdot H^2 + \beta_5 \cdot D \cdot H^2$ |
| | M6 | Burkhart (1977) | $V = \beta_0 + \beta_1 \cdot d^{\beta_2} \cdot h^{\beta_3} + \varepsilon$ |

Dónde: d es el diámetro a la altura de pecho (cm) medido a 1.3 m sobre el suelo, h es la altura total (m), V es el volumen total (m^3), β_i son los parámetros a ser estimados y ε es el error aleatorio del modelo.

Criterios de evaluación

La selección del mejor modelo se hizo a partir de la bondad de ajuste, medida con el cuadrado medio del error (CME), la suma de cuadrados del error (SCE), significancia de los parámetros y la raíz del error medio cuadrático (REMC) (Schlaegel, 1982; Parresol, 1999; Tedeschi, 2006), (Ecuación 4),

$$REMC = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n - p}} \quad (4)$$

el coeficiente de determinación ajustado por el número de parámetros del modelo (R^2_{adj}) (Ecuación 5),

$$R^2_{adj} = 1 - (1 - R^2) \left(\frac{n-1}{n-p} \right) \text{ siendo } R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (5)$$

el sesgo absoluto (\bar{E}), que evalúa la desviación del modelo con respecto a los valores observados (Ecuación 6)

$$\bar{E} = \sum_{i=1}^n \frac{Y_i - \hat{Y}_i}{n}$$

Dónde: \hat{Y}_i , Y_i y \bar{Y}_i , son los valores estimados, observados y promedios del ahusamiento (d) respectivamente, n es el número total de datos usadas en el ajuste de los modelos, p es el número de parámetros a estimar.

Para verificar el cumplimiento de los supuestos de homogeneidad de varianzas, la independencia de la frecuencia de los residuos y la normalidad en la regresión se usaron las pruebas de Breusch (SAS, 2010), Durbin-Watson (Durbin & Watson, 1971) y Shapiro-Wilk (Augusto *et al.*, 2009).

Se generó un criterio de calificación que de acuerdo con Sakici *et al.*, (2008); que consistió en jerarquizar cada estadístico de cada modelo asignando valores consecutivos del 1 al 6 en función al orden de importancia (1 correspondió al mejor valor del estadístico y 6 al valor más pobre), posteriormente la sumatoria de los valores conforme la calificación total a cada modelo, por comparación se identificaron los mejores modelos, siendo mejores aquellos con el más bajo valor en la calificación total.

RESULTADOS

Teniendo como base el conjunto de datos de 128 árboles de *T. grandis* L. f. procedentes de 6 sitios de muestreo; se presentan los valores de los parámetros de cada uno de los modelos ajustados así como sus indicadores de bondad de ajuste, nivel de confiabilidad (Tabla 3) y el sistema de calificación total más bajo implementado que es considerada como la mejor ajustada al rango de datos (Tabla 4).

Tabla 3. Valores de los estadísticos de bondad de ajuste de los seis modelos evaluados en la estimación del volumen total del fuste de *T. grandis* L. f.

| MODELO | R^2_{adj} | SCE | CME | β | Valor | Error | Prob>T | REMC | DW | Sesgo | No |
|-----------------|-------------|-------|---------|---------|-----------|----------|--------|--------|------|---------|----|
| | | | | i | Estimado | Estándar | | | | | |
| BURKHART | .824 | .0398 | .000321 | 0 | 0.038774 | 0.0131 | 0.0038 | 0.0179 | 2.01 | -0.0035 | 1 |
| | | | | 1 | 8.43E-06 | 0.000012 | 0.4807 | | | | |
| | | | | 2 | 2.47297 | 0.3338 | <.0001 | | | | |
| | | | | 3 | 0.903432 | 0.2037 | <.0001 | | | | |
| AUSTRALI ANA | .823 | .0402 | .000324 | 0 | 0.048087 | 0.0401 | 0.233 | 0.0180 | 1.99 | -0.0014 | 2 |
| | | | | 1 | -7.06E-06 | 0.000157 | 0.9641 | | | | |
| | | | | 2 | 0.000032 | 0.000012 | 0.0072 | | | | |
| | | | | 3 | -0.00238 | 0.00308 | 0.4415 | | | | |
| STOAT | .822 | .0400 | .000325 | 0 | -0.16848 | 0.1424 | 0.2391 | 0.0180 | 2.02 | -0.0025 | 3 |
| | | | | 1 | -0.00002 | 0.000196 | 0.9282 | | | | |
| | | | | 2 | 0.000017 | 7.49E-06 | 0.0245 | | | | |
| | | | | 3 | 0.011507 | 0.0053 | 0.0319 | | | | |
| | | | | 4 | 0.9428 | 0.8627 | 0.2766 | | | | |
| MEYER | .824 | .0399 | .000322 | 0 | 0.127677 | 0.0535 | 0.0184 | 0.0179 | 2.01 | -0.0053 | 4 |
| | | | | 1 | -0.01842 | 0.00654 | 0.0056 | | | | |
| | | | | 2 | 0.000815 | 0.000195 | <.0001 | | | | |
| | | | | 3 | 0.000374 | 0.000067 | <.0001 | | | | |
| PRODAN | .823 | .0404 | .000323 | 0 | 0.017514 | 0.00646 | 0.0077 | 0.0180 | 1.99 | 0.0235 | 5 |
| | | | | 1 | 0.000023 | 4.00E-06 | <.0001 | | | | |
| | | | | 2 | 0.000103 | 0.000066 | 0.1247 | | | | |
| NASLUD | .822 | .0401 | .000326 | 0 | 0.026535 | 0.0253 | 0.2965 | 0.0181 | 2.01 | 0.0442 | 6 |
| | | | | 1 | -0.00011 | 0.000218 | 0.6128 | | | | |
| | | | | 2 | 0.00005 | 0.000027 | 0.0637 | | | | |
| | | | | 3 | -0.00003 | 0.000037 | 0.4325 | | | | |
| | | | | 4 | 0.000194 | 0.000386 | 0.6159 | | | | |

Dónde: R^2_{adj} =Coeficiente de determinación ajustado; SCE=Suma de cuadrado del error. CME=Cuadrado medio del error; β_i = Parámetros estimados; REMC=Raíz del cuadrado medio del error; DW=Durbin Watson.

Tabla 4. Sistema de calificación para los modelos de volumen total del fuste.

| Modelo | R^2_{adj} | SCE | CME | REMC | Sesgo | Calificación total |
|--------|-------------|-----|-----|------|-------|--------------------|
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 3 | 7 |
| 2 | 4 | 5 | 4 | 4 | 1 | 18 |
| 3 | 5 | 3 | 5 | 3 | 2 | 18 |
| 4 | 2 | 2 | 2 | 2 | 4 | 12 |
| 5 | 3 | 6 | 3 | 5 | 5 | 22 |
| 6 | 6 | 4 | 6 | 6 | 6 | 28 |

Los modelos se ajustaron con el método de mínimos cuadrados ordinarios, cuando se minimiza el cuadrado medio del error, como el caso de los modelos 1 y 4 (modelo (1), CME=0.000321 y modelo (4), CME=0.000322); se detectan los valores más pequeños con respecto a los otros modelos, que dan una expresión explícita de los coeficientes estimados.

Se observa que el modelo 1 de Burkhardt (1977), presenta los criterios de bondad de ajuste mejor y la calificación total más baja; sin embargo el parámetro β_1 (0.4807) no fue significativo por lo que se descarta el ajuste modelo.

Es necesario elegir uno; y en base a los criterios de selección del mejor modelo se puede elegir el modelo 4 de Meyer (1941), que en orden de calificación presenta la más baja después del modelo 1 de Burkhardt (1977), y los mejores criterios de bondad de ajuste con respecto a los otros modelos.

El modelo 4 de Meyer (1941) presenta un valor del coeficiente de determinación ajustado (R^2_{adj})= 0.8246, el cual explica arriba de 82% la variabilidad total presente en la variable dependiente; un valor de sesgo absoluto= -0.0053 que indica que se tiene la mínima desviación del modelo con respecto a los valores observados, un valor de RECM= 0.0179 que es un valor menor con respecto a los demás modelos, menor valor de SCE= 0.0399 y una alta significancia en cada uno de sus parámetros (Tabla 3); por lo que se considera el apropiado

para predecir con mayor precisión el volumen total en función del diámetro normal (d) y la altura total (HT).

Para el análisis de la distribución de los residuos (diferencias entre valor observado y valor predicho), mediante un gráfico se observa la distribución de los residuales y de esta forma se evidencia alguna deficiencia en las ecuaciones de regresión de mejor ajuste (Chacín, 1998). El resultado presentó heterocedasticidad manifestada en un patrón de dispersión que es una forma típica de un aumento de la varianza residual con la variable explicativa (Figura 12 a).

Requiriéndose un análisis mínimo cuadrático ponderado (Martínez y Castillo, 1987). Este procedimiento proporciona estimadores insesgados y eficientes (Torres y Magaña, 2001). Se llevó a cabo ponderación para mejorar las estimaciones, y para ello es necesario utilizar un factor de ponderación, el cual debe tener una relación directa con la varianza del volumen. La ponderación se ejecutó en el modelo 4; Meyer (1941), con los siguientes factores de ponderación señalados en la tabla 5.

Tabla 5. Factores de ponderación utilizados en la regresión del modelo de Meyer (1941).

| Modelo | Factor utilizado |
|-----------------|--|
| Meyer (1941) | 1.- $\left(\frac{1}{D^2H}\right)$ |
| | 2.- $\left(\frac{1}{\sqrt{D^2H}}\right)^*$ |
| | 3.- $\left(\frac{D}{\sqrt{D^2H}}\right)$ |

*Mostró mayor efectividad

Para considerar que una ponderación es buena con respecto a otra, es necesario revisar la estructura de los residuales respecto a las variables ponderadas y la calidad de los parámetros evaluada a través de sus errores estándar (deben ser menores que la versión no ponderada) (Reyes, 2006). Un análisis a mayor detalle de los parámetros se puede ver en la Tabla 6.

Tabla 6. Valor ponderado de los criterios de los parámetros estadísticos del modelo de Meyer (1941).

| ECUACIÓN | R^2_{adj} | SCE | CME | β_i | Valor Estimado | Error Estándar | Prob>T | REMC | DW | Sesgo |
|-----------------|-------------|-------|---------|-----------|-------------------|-------------------|--------|--------|-----|---------|
| Sin Ponderar | .8246 | .0399 | .000322 | 0 | 0.127677 | 0.0535 | 0.0184 | 0.0179 | 2.0 | -0.0053 |
| | | | | 1 | -0.01842 | 0.00654 | 0.0056 | | 1 | |
| | | | | 2 | 0.000815 | 0.000195 | <.0001 | | | |
| | | | | 3 | 0.000374 | 0.000067 | <.0001 | | | |
| Ponderado | .8258 | .0083 | .000067 | 0 | 0.124745 | 0.0627 | 0.049 | 0.0081 | 2.0 | -0.0070 |
| | | | | 1 | -0.01806 | 0.00752 | 0.0179 | | 0 | |
| | | | | 2 | 0.000806 | 0.000223 | 0.0004 | | | |
| | | | | 3 | 0.000373 | 0.000065 | <.0001 | | | |

Dónde: R^2_{adj} =Coeficiente de determinación ajustado; SCE=Suma de cuadrado del error. CME=Cuadrado medio del error; β_i = Parámetros estimados; REMC=Raíz del cuadrado medio del error; DW=Durbin Watson.

En el modelo de Meyer (1941) no hubo complicaciones en la ponderación, con el factor utilizado (No.2) que mostró mayor efectividad congruente en los resultados obtenidos. Los parámetros estimados en la regresión ponderada tienen una menor varianza que los hace más deseables como estimadores de los coeficientes de regresión (Monroy y Nava, 2004). El valor de las constantes en algunos casos aumentaron y en otros su valor fue menor. La ponderación de los residuales, hace que se cumpla con el supuesto de que la varianza de la variable dependiente sea constante en cualquiera de los niveles de las variables independientes, obteniendo los mejores estimadores insesgados (Tabla 6). Por lo que se propone el uso de la ecuación presentada en la elaboración de la tabla de volumen, una vez corregida la heterocedasticidad (Figura 12 b).

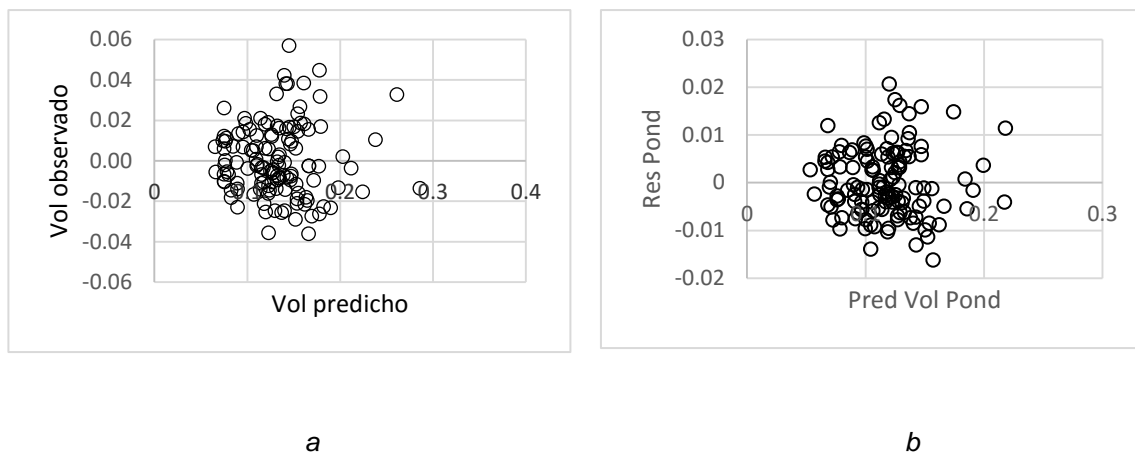


Figura 12. Distribución de residuos del modelo de volumen total de Meyer (1941) para *T. grandis*; (a) sin regresión ponderada y (b) con regresión ponderada.

Una vez examinado el cumplimiento de los supuestos de la regresión ponderada en el modelo de Meyer (1941); se realizó la prueba de la normalidad de Shapiro-Wilk, la cual mostró un valor de 0.98, los porcentajes de frecuencias relativas acumuladas de los residuales se asemejan a una línea recta; respecto de la probabilidad de la distribución normal; sus porcentajes tienden a formar una campana de Gauss (Figura 13).

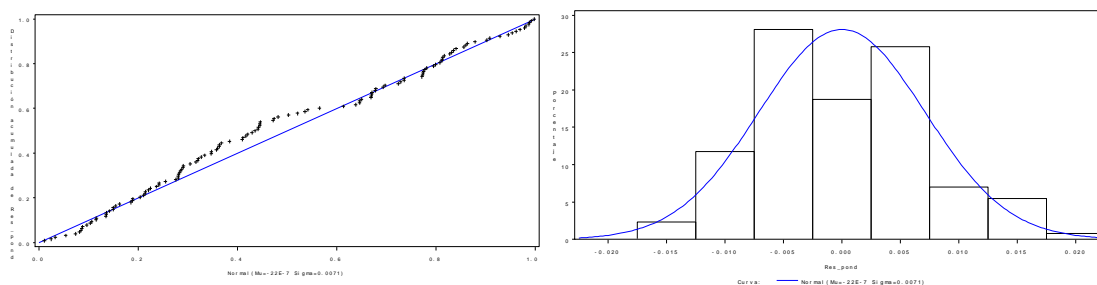


Figura 13. Porcentaje de frecuencias relativas acumuladas de los residuales frente a la distribución normal para el modelo de Meyer (1941) para *T. grandis* L. f. en Nuevo Urecho, Michoacán.

El contraste de la prueba Durbin–Watson de independencia de la frecuencia de los residuos demuestra que están incorrelacionados ($DW=2.0075$), por lo que de acuerdo con Augusto *et al.*, (2009), los que tengan un valor más cercano a 2

en dicha prueba, no violan los supuestos de la regresión y son los mejores para la estimación de la variable dependiente.

Por lo tanto la ecuación generada de volumen total para el fuste a partir de los valores de los parámetros de la Tabla 6, para el modelo de Meyer (1941), queda definida como:

$$V = 0.124745 + -0.01806 * d + 0.000806 * d^2 + 0.000373 * d * h + \varepsilon$$

Dónde: V = volumen total del fuste en m^3

D = diámetro normal en cm

H = altura total en m.

DISCUSIÓN

Con base en los valores estadísticos de ajuste nos revela que el R^2_{adj} de los modelos básicamente no varió. Se propone el uso del modelo de Meyer (1941) puesto que; en base al sistema de calificación empleado y mediante el empleo de regresión ponderada con el factor $\left(\frac{1}{\sqrt{D^2 H}}\right)$ en el ajuste de la ecuación de volumen total, presenta una mejora en la estimación de los criterios de bondad de ajuste y de los parámetros, además de una notable disminución de la heterogeneidad de varianzas, producto del uso en el ajuste de datos de cubicación de árboles de diferentes tamaños (Barrio *et al.*, 2004). El modelo de Meyer (1941) en base al valor de ajuste de R^2_{adj} , coincide con lo reportado por García *et al.* (1999) con un valor de R^2_{adj} 0.8 para plantaciones de teca a la edad de 25 años.

El modelo seleccionado para la plantación en estudio coincide con Muñoz *et al.*, (2012), que al ajustar los modelos de Schumacher y Meyer obtuvieron valores idénticos entre ellos para la predicción de volúmenes de fuste total para plantaciones de *Pinus greggii* Engelm., con árboles de diferentes edades y un

intervalo de valores del diámetro normal de 5 a 55 cm; ya que al final ambos producen la misma estructura.

Armijos (2013) aplicó la ecuación lineal múltiple en la elaboración de tablas de volumen local de doble entrada, para *Tectona grandis* L. f. en rodales de 13 años; y concluye que esta ecuación puede ser aplicada en otras plantaciones con condiciones similares al sitio de plantación.

Utilizando el modelo de Meyer (1941) es posible calcular de manera más precisa el volumen de fuste total en plantaciones de teca como lo demostraron Camacho y Madrigal, (1997) y Torres, (2004), quienes utilizaron modelos matemáticos para la estimación del volumen del fuste total.

Por ello es importante el ajuste y selección de modelos matemáticos que permitan predecir el volumen de fuste total en plantaciones forestales comerciales con condiciones diferentes de sitio y manejo silvícola empleado.

Es viable desarrollar con mayor extensión esta investigación mediante la aplicación de un esquema de índice de sitio para calificar la productividad de los terrenos donde se establece la plantación como lo realizado por Camacho *et al.*, (2013); o un sistema de cubicación para árboles individuales mediante funciones compatibles de ahusamiento-volumen como lo realizaron Tamarit *et al.*, (2014).

CONCLUSIONES

Los modelos matemáticos permiten predecir en forma confiable el volumen de madera en árboles de manera flexible. Se recomienda el uso del modelo de Meyer (1941) para la predicción del volumen total del fuste en función del diámetro normal (1.30 m) y la altura total para *Tectona grandis* en plantaciones del estado de Michoacán.

Es posible incorporarlo el modelo de Meyer (1941), a los sistemas de crecimiento y productividad, con la finalidad de realizar determinaciones más

precisas del volumen existente en plantaciones de *Tectona grandis* L. f. establecidas en el estado de Michoacán.

El modelo desarrollado representa una importante herramienta que puede ser usada para la cuantificación de volumen de fuste total más precisa.

REFERENCIAS

Armijos, D. D. 2013. Construcción de Tablas Volumétricas y Cálculo de Factor de Forma (FF.) para dos especies, Teca (*Tectona grandis*) y Melina (*Gmelina arborea*) en tres plantaciones de la Empresa Reybanpac CA en la provincia de Los Ríos.

Augusto, C. T., J. O. Vargas. y M. Escalier. 2009. Ajuste y selección de modelos de regresión para estimar el volumen total de árboles. Documento Técnico No. 5. Escuela de Ciencia Forestales de la Universidad Mayor de San Simón. Cochabamba, Bolivia. 27 p.

Barrio, M., J. González, y J. Díaz. 2004. Elaboración de una tarifa con clasificación de productos para *Quercus robur* L. en Galicia basada en un modelo de volumen porcentual. Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales 13 (3): 506-517.

Camacho, P. y T. Madrigal. 1997. Ecuaciones de volumen preliminares para *Tectona grandis*. Presentado al Congreso Forestal Nacional (3. Ago. 1997, MINAE, San José, Costa Rica). p: 131-133.

Camacho-Linton. A., H. Ramírez-Maldonado., H.M. De los Santos-Posadas. y F.J. Zamudio-Sánchez. 2013. Tablas de rendimiento para teca (*Tectona grandis* L.) en el Estado de Campeche. Revista Mexicana de Ciencias Forestales 4 (19): 92-101.

Chacín, L. F. 1998. Análisis de regresión y superficie de respuesta. UCV-Agronomía. Venezuela. 274 p.

CONAFOR, Comisión Nacional Forestal. 2013. Programa de desarrollo de plantaciones forestales comerciales. A 15 años de su creación. Comisión Nacional Forestal. Zapopan, Jalisco, México. 190 p.

DETENAL, Dirección de Estudios del Territorio Nacional. 1979. Descripción de la leyenda de la carta edafológica. México. p: 87-89.

Draper, N. R. y H. Smith. 1998. Applied regression analysis. John Wiley & Sons, Inc. New York, NY, USA. 544 p.

Finger, C.A.G. 1992. FATEC Fundamentos de Biometría Forestal. Universidad Federal de Santa María. Brasil. 269 p.

García, I., D. Fidalgo., M. Fria. y E. Aldana. Índice de sitio y tablas de crecimiento para plantaciones jóvenes de *Tectona grandis* L. en la Unidad Silvícola Guisa. Granma, Cuba, Universidad Pinar del Río. 15 p.

Husch, B. 1963. Forest Mesuration and Statistical. Ronald Press. U.S.A. 174 p.

Hynynen, J. 2011. Conceptos básicos para la modelación del crecimiento forestal. Recursos Naturales y Ambiente (64): 22-27.

INAFED, Instituto para el Federalismo y el Desarrollo Municipal. 2010. Michoacán de Ocampo. Disponible en: <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM16michoacan/index.html> (Consultada: 24 de Febrero del 2016).

INEGI, Instituto Nacional de Estadística Geográfica e Informática. 1985. Síntesis Geográfica del Estado de Michoacán. Instituto Nacional de Estadística Geográfica e Informática. Secretaría de Programación y Presupuesto. México. D.F. 341 p.

Martínez, G. A. y A. M. Castillo. 1987. Teoría de la regresión con aplicaciones agronómicas. Colegio de Posgraduados. Chapingo, México. 490 p.

Monroy, R. C. y J. J. Návar. 2004. Ecuaciones de aditividad para estimar componentes de biomasa de *Hevea brasiliensis* Muell. Arg., en Veracruz, México. Madera y Bosques 10 (2): 29-43.

Muñoz, H. J. F., J. C. Velarde-Ramírez., J. J. García-Magaña., J. Sáenz-Reyes., E. H. Olvera-Delgadillo., y J. Hernández-Ramos. 2012. Predicción de volúmenes de fuste total para plantaciones de *Pinus greggii* Engelm. Revista Mexicana de Ciencias Forestales 3(14): 11-22.

Parresol, B. R. 1999. Assessing tree and stand biomass: a review with examples and critical comparisons. Forest Science 45(4): 573–593.

Perez, L.D. y M. Kanninen. 2003. Heartwood, sapwood and bark content, and wood dry density of young and mature teak (*Tectona grandis*) trees grown in Costa Rica. Silva Fennica 37(1):45-54.

Reyes, J.R. 2006. Sistema de cubicación para *Eucalyptus grandis* y *E. urophylla* en los límites de Veracruz y Oaxaca. UACH. Chapingo. México. 67 p.

Sakici, O. E., N. Misira., H. Yavuza y M. Misira. 2008. Stem taper functions for *Abies nordmanniana* subsp. *Bornmulleriana* in Turkey. Scandinavian Journal of Forest Research 23 (6): 522-533.

Schlaegel, B.E. 1982. Acer negro biomass component regression analysis for the Mississippi Delta. Forest Science (28):355-358.

Statistical Analysis System. 2010. Base SAS® 9.2 Procedures Guide: Statistical Procedures, SAS Institute Inc. 3rd. Edition. Cary, NC, USA, n/p.

Tamarit, J. C., H.M. De los Santos-Posadas., A. Aldrete., J.R. Valdez-Lazalde., H. Ramírez-Maldonado. y V. Guerra-De la Cruz. 2014. Volume estimation system for individual *Tectona grandis* L. f. trees through compatible taper/volume functions. Revista Mexicana de Ciencias Forestales 5(21): 58-74.

Tedeschi, L.O. 2006. Assessment of the adequacy of mathematical models. *Agricultural Systems* (89): 225–247.

Torres, D. A. 2004. Modelación del crecimiento y producción en volumen y biomasa de la teca. Tesis. Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín. 51 p.

Vallejo, A. y J. Avendaño. 2013. Modelos de crecimiento y rendimiento In: Camino, R. y J. P, Morales, eds. *Las plantaciones de teca en América Latina: Mitos y Realidades*. CATIE. Turrialba, C. R. p: 114-133.

CAPÍTULO III. PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DE *Tectona grandis* L. f. DE UNA PLANTACIÓN COMERCIAL EN NUEVO URECHO, MICHOACÁN

RESUMEN

El objetivo fue determinar las propiedades físico-mecánicas de la madera de teca de una plantación comercial en Nuevo Urecho, Michoacán y compararlas con otras experiencias en México y de otras regiones del mundo. El material vegetal procedió de 6 árboles de *Tectona grandis* L. f.; seleccionados en base a sus características dasométricas representativos de cada sitio de muestreo permanente. Se siguió la metodología sugerida por las normas COPANT (1972); de cada fuste se obtuvo una troza de 1 metro de longitud para elaborar las viguetas y de éstas, las probetas para los ensayos físicos y mecánicos. Los resultados obtenidos en los ensayos de la madera de *T. grandis* L. f. presentan una densidad básica de 0.59 g/cm^3 ; categorizada como madera pesada; contracción volumétrica, tangencial y radial, clasifican a la madera de teca como una madera de estabilidad estable, con una contracción volumétrica total muy baja (5.15%). Compresión paralela, observó una resistencia de 326.18 kgf/cm^2 la cual se clasifica alta; compresión perpendicular mostró un esfuerzo de 33.62 kgf/cm^2 el cual se clasifica como bajo; el ensayo de desgarre o clivaje, observó una RMC de 44.31 kgf/cm^2 clasificándose como media; la cizalla mostró una resistencia baja a media de 63.20 kgf/cm^2 , la dureza mostró valores promedio de 545 kgf, clasificando su resistencia como madera semidura. Pese a que se trata de madera joven; los resultados mostraron que algunas propiedades de la madera plantada en Nuevo Urecho, Michoacán; se aproximan a las de maderas de teca en estudios de otras procedencias; mientras que otras propiedades fueron ligeramente inferiores a las reportadas de otras procedencias.

Palabras clave: Madera, usos, densidad, contracción, compresión.

ABSTRACT

The objective was to determine the physical-mechanical wood teak commercial plantation in Nuevo Urecho, Michoacan and compare them to other experiences in Mexico and other regions properties. The plant material came from 6 trees of *Tectona grandis* L. f.; selected based on their representative characteristics of each site dasometric permanent sample. The methodology suggested by the COPANT (1972) standards are followed; each shaft a log of 1 meter in length was obtained to develop the joists and of these specimens for physical and mechanical tests. The results obtained in tests of wood *T. grandis* L. f. they have a basic density of 0.59 g/cm^3 ; categorized as heavy wood; volumetric, tangential and radial contraction, classify teak wood stable as a stable, with a very low total volumetric shrinkage (5.15%). Parallel compression, observed a resistance of 326.18 kgf/cm^2 which is classified high; compression perpendicular showed an effort of 33.62 kgf/cm^2 which is classified as low; tear test or cleavage, she noted a CMR 44.31 kgf/cm^2 classified as average; shear strength showed a low average 63.20 kgf/cm^2 , showed average hardness values of 545 kgf, classifying resistance as semi-hard wood. Although wood is young; the results showed that some properties of wood planted in Nuevo Urecho, Michoacan; They approach the teak wood in studies from other sources; while other properties were slightly lower than those reported from other sources.

Keywords: Wood, uses, density, contraction, compression.

INTRODUCCIÓN

La teca (*Tectona grandis* L. f.) es una madera tropical dura considerada como una madera fina y de gran valor en el mercado (ITTO, 2013). La madera es considerada como una de las más valiosas del mundo por su atractivo y durabilidad, resistencia al ataque de hongos e insectos y, por sus excelentes características (Fonseca, 2004). Es usada para la construcción de puentes y muelles (por su excelente resistencia al agua), vagones y durmientes de ferrocarril, carpintería e incluso se utiliza para la cubierta de los barcos (FAO, 2010). En México, se estima el consumo anual de teca en 12.5 millones de m³, mientras que la producción local es de 9.4 millones de m³, lo que genera la necesidad de estar importando de otros países. Al 2014 existen 25,324 ha plantadas de teca (CONAFOR, 2014).

Los ensayos de las propiedades físicas y mecánicas de las maderas se realizan con el objeto de proponer los usos probables y obtener datos necesarios para el cálculo de estructuras de maderas. Es necesario que los datos obtenidos permitan el uso adecuado de la madera en proporción mínima, y que garanticen seguridad en los parámetros de diseño (Hoheisel, 1981 citado por Encalada y Castillo, 1988). A nivel internacional se han desarrollado trabajos de investigación tendientes a determinar las propiedades físico-mecánicas de la madera de teca. En Costa Rica, determinaron algunas propiedades de las especies, *T. grandis* y *T. amazonia*, provenientes de plantaciones comerciales; evaluaron la contracción en dirección radial (CR), tangencial (CT) y volumétrica (CV); el coeficiente diferencial CT/CR o índice de distorsiones y alabeos y su relación con las propiedades físicas como peso específico básico (PEB), punto de saturación de la fibra (PSF), densidad normal (DN) y contenido de humedad (CH) (Muñoz y Moreno, 2013). En Brasil, Flórez *et al.*, (2014) caracterizaron las propiedades de madera joven de plantaciones de *Tectona grandis* L. f. y compararon con datos obtenidos en maderas de plantaciones de la misma especie en otros lugares alrededor del mundo. En México, Rodríguez *et al.*,

(2014) determinaron la influencia de la edad y procedencia en las propiedades físico-mecánicas de la madera de teca de plantaciones comerciales de Campeche, Tabasco y Chiapas. El conocimiento del comportamiento de las propiedades físico-mecánicas de la madera de teca simplifican los procesos de transformación para productos finales de la madera. Considerando que la especie es introducida en México y que a nivel general existe información que evalúa las propiedades físico-mecánicas de la teca en algunas regiones del mundo; son escasos los estudios reportados en nuestro país referente a las propiedades físico-mecánicas; por lo que resulta indispensable conocer sus propiedades.

OBJETIVO

El objetivo del presente trabajo fue determinar las propiedades físico-mecánicas de la madera de teca de una plantación comercial en Nuevo Urecho, Michoacán y compararlas con otras experiencias en México y de otras regiones del mundo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El material vegetal procedió de 6 árboles de *Tectona grandis* L. f.; seleccionados en base a sus características dasométricas representativos de cada sitio de muestreo permanente de la plantación forestal comercial ubicada en el paraje "El Mirador", municipio de Nuevo Urecho, Michoacán (Centro Occidente de México). La región forma parte del Eje Neovolcánico Transversal; formado por los cerros: El Tipítaro, de las Gallinas, de Agua Fría y de las Cuevas (INAFED, 2009). Su delimitación geográfica está comprendida entre las coordenadas geográficas de latitud N 19°11'39.6" y longitud W 101°51'53.3", y una altitud promedio de 617 m. El suelo es Vertisol pélico (Vp), de color negro a gris oscuro, que se caracteriza por presentar grietas anchas y profundas en la época de sequía (DETENAL, 1979). El clima es Awo(w) cálido subhúmedo con lluvias en verano, temperatura media anual de 29°C y precipitación anual 1,000 mm (DETENAL, 1979; INEGI, 1985).

Los ensayos físicos y mecánicos se realizaron en el Laboratorio de Tecnología de la Madera del Instituto Tecnológico de El Salto, P.N., Durango. Las pruebas mecánicas se realizaron en una máquina Universal de ensayos mecánicos, marca INSTRON® con capacidad de 60 toneladas de presión.

Selección de los árboles muestra

Para la colecta del material se siguió las recomendaciones de la Norma COPANT 458 (Comisión Panamericana de Normas Técnicas) referida a la selección y colección de muestras destinadas al estudio de las propiedades físicas y mecánicas de la madera. A cada árbol seleccionado se le midieron sus características dasométricas (Tabla 7).

Tabla 7. Características dasométricas de los árboles seleccionados para los ensayos físicos y mecánicos.

| Sitio No. | Diámetro normal (cm) | Altura total (m) | Volumen (m ³) | Edad (años) |
|-----------|----------------------|------------------|---------------------------|-------------|
| 1 | 18.00 | 14.00 | 0.17758 | 11 |
| 2 | 16.00 | 14.20 | 0.13849 | |
| 3 | 15.10 | 17.60 | 0.12609 | |
| 4 | 15.40 | 12.70 | 0.12288 | |
| 5 | 13.00 | 10.40 | 0.08604 | |
| 6 | 12.30 | 9.10 | 0.06061 | |
| Promedio | 14.97 | 13.00 | 0.11862 | |

De cada fuste, se obtuvo una troza 1 metro de longitud para elaborar las viguetas y de éstas, las probetas necesarias para los ensayos físicos y mecánicos. Cada troza se dividió en cuadrantes (N, S, E, W) para que las probetas generadas tuvieran bien definidos los planos radial y tangencial de acuerdo a las recomendaciones de Quiñones (1974). Cada vigueta consistió de un prisma de 7 x 7 cm de sección transversal por 100 cm de longitud, las cuales se enumeraron indicando el número del árbol y la troza correspondiente. La elaboración final de las probetas se realizó de acuerdo a lo indicado en las normas COPANT (COPANT, 1972).

Preparación de las probetas

Las probetas del ensayo se elaboraron en la Unidad de Tecnología de la Madera del ITF. El material que se ensayó en seco, se apiló bajo techo y se acondicionó hasta alcanzar 48.04% de contenido de humedad, estado en el cual se elaboraron las probetas definitivas. Se elaboraron doce probetas para determinar la densidad de la madera y doce probetas para determinar las contracciones de la madera.

Determinación de propiedades físicas

Para la elaboración y ejecución de los ensayos físicos de la madera, se siguió la metodología sugerida por las normas: COPANT 459 (Acondicionamiento de las maderas destinadas a ensayos físicos y mecánicos); 460 (Método de determinación del contenido de humedad en maderas); 461 (Cálculo del peso específico en maderas) y 462 (Determinación de las contracciones en maderas) (COPANT, 1972). Se utilizaron probetas de 2 x 2 x 4 pulgadas para determinar las contracciones de la madera y probetas de 2 cm de lado para la densidad de la madera.

Contenido de humedad

La norma COPANT 460 menciona el método para la determinación del contenido de humedad de la madera tanto en estado verde como en estado seco y se calcula por la fórmula siguiente:

$$CH = \frac{P_h - P_o}{P_o} * 100 \quad (1)$$

Dónde: C_H =Contenido de humedad (%)

P_h =El peso de la madera húmeda (g)

P_o =El peso anhidro (secado en estufa) de la madera (g)

Contracción de la madera

Se extrajeron 12 probetas de 2 x 2 x 4 pulgadas para destinarlos a los ensayos de contracción e hinchamiento. Inmediatamente después de ser elaboradas se marcaron dos puntos de medición en la cara tangencial y radial para tomar las lecturas en el mismo punto, se pesaron en la báscula digital para la obtención del peso inicial y se midieron las dimensiones de las probetas en estado verde. Posteriormente se introdujeron en una estufa de secado iniciando con 85°C la cual fue incrementándose hasta llegar a los 105 °C durante los cinco días en que fue monitoreada la pérdida de humedad hasta alcanzar peso constante, realizando una última remediación de sus planos en estado anhidro. Los cálculos se realizaron de acuerdo a la norma COPANT 462 como sigue:

$$Contracción (\beta) = \frac{D_v - D_o}{D_v} * 100 \quad (2)$$

Dónde: β = Contracción radial, tangencial o volumétrica (%)

D_v = Dimensión radial tangencial o verde (cm)

D_o = Dimensión radial o tangencial anhidra (cm)

Relación de anisotropía

La relación que se utilizó para su cálculo fue:

$$RAN = \frac{\beta_{tt}}{\beta_{tr}} \quad (3)$$

Dónde: RAN = Relación de anisotropía (adimensional)

β_{tt} = Contracción tangencial total (%)

β_{tr} = Contracción radial total (%)

Densidad de la madera

El método para calcular la densidad de la madera se realizó en base a la norma COPANT 461, la cual sugiere las dimensiones que deben tener las probetas y el instrumental que se debe utilizar. Para la realización de esta prueba se elaboraron muestras que consistieron en 12 probetas de madera de 2 x 2 x 2 centímetros, inmediatamente después de haber sido extraídos se midieron con un vernier y se pesaron en una báscula digital. Enseguida se introdujeron en una estufa de secado a una temperatura de 105 °C monitoreándolas hasta obtener el peso constante, posteriormente se volvieron a medir y pesar para registrar los pesos y volúmenes anhidros para utilizar posteriormente las siguientes relaciones:

$$D_b = \frac{P_o}{V_v}$$

(4)

Dónde: D_b = Densidad básica (g/cm³)

P_o = El peso anhidro (secado en estufa) de la madera (g)

V_v = El volumen verde de la probeta (cm³)

$$D_v = \frac{P_v}{V_v}$$

(5)

Dónde: D_v = Densidad verde (g/cm³)

P_v = El peso verde de la madera (g)

V_v = El volumen verde de la probeta (cm³)

$$D_o = \frac{P_o}{V_o}$$

(6)

Dónde: D_o = Densidad seca (g/cm³)

P_o = El peso anhidro (secado en estufa) de la madera (g)

V_o = El volumen anhidro de la probeta (cm^3)

Determinación de las propiedades mecánicas

Para la realización de los ensayos mecánicos, se respetó la metodología recomendada en las normas: COPANT 459 (Acondicionamiento de las maderas destinadas a ensayos físicos y mecánicos); se realizaron seis diferentes tipo de probetas para los ensayos de compresión paralela (COPANT 464; método de determinación de la compresión axial o paralela al grano) y perpendicular (COPANT 466; método de determinación de la compresión perpendicular al grano), tensión perpendicular (COPANT 743; método de ensayo de tracción perpendicular al grano), clivaje o desgarre (COPANT 741; método de determinación de la resistencia al clivaje o desgarre), cizalla o rajado (COPANT 463; método de determinación del cizallamiento paralelo al grano) y dureza (COPANT 465; método de determinación de la dureza).

Compresión paralela al grano

Para el ensayo de compresión paralela al grano se utilizaron 6 probetas de 8 x 2 x 2 pulgadas. La aplicación de carga fue a razón de 0.6 mm/min. Los datos obtenidos permitieron determinar los esfuerzos al límite proporcional (ELP_c) y a la carga máxima (ECM_c), el módulo de elasticidad (MOE_c):

Esfuerzo al límite proporcional (ELP_c).

$$ELP_c = \frac{P2}{a * b} \quad (7)$$

Dónde: ELP_c = Esfuerzo al límite proporcional (kgf/cm^2)

$P2$ = La carga en el límite de proporcionalidad (kgf)

a = Ancho de la probeta (cm)

b = Grosor de la probeta (cm)

Esfuerzo a la carga máxima (ECM_c).

$$ECM_c = \frac{Pm}{a * b}$$

(8)

Dónde: ECM_c = Esfuerzo a la carga máxima (kgf/cm^2)

Pm = La carga máxima (kgf)

a = Ancho de la probeta (cm)

b = Grosor de la probeta (cm)

Módulo de elasticidad (MOE_c).

$$MOE_c = \frac{P2 * L}{d * a * b}$$

(9)

Dónde: MOE_c = El Módulo de elasticidad (kgf/cm^2).

$P2$ = La carga en el límite de proporcionalidad (kgf)

L = La distancia entre las abrazaderas del deflectómetro (cm)

d = La deformación sufrida por la probeta en el límite de proporcionalidad (cm)

Compresión perpendicular al grano

El ensayo de compresión perpendicular al grano se realizó en 6 probetas con medidas de 6 x 2 x 2 pulgadas. La velocidad del ensayo fue de 0.3 mm/min. El cálculo correspondiente es la resistencia al límite de proporcionalidad:

Esfuerzo al límite proporcional (ELP).

$$ELP = \frac{P2}{S}$$

(10)

Dónde: ELP = Esfuerzo al límite proporcional (kgf/cm^2)

$P2$ = Carga al límite proporcional (kgf)

S = Superficie impresa sobre la probeta por la pieza de presión (cm^2)

Tensión perpendicular al grano

El método de ensayo de tensión perpendicular al grano se realizó con 12 probetas de dimensiones de 2 x 2 x 2.5 pulgadas. La mitad de las probetas se elaboraron de tal forma que la superficie de rotura fuera un plano tangencial a los anillos de crecimiento y la otra mitad en un plano radial. La velocidad de aplicación de la carga del ensayo fue de 2.5 mm/min. Con la carga soportada por la probeta se calculó el esfuerzo máximo a tensión perpendicular. Posteriormente, de una sección de la superficie de rotura se destinó para calcular el contenido de humedad:

Esfuerzo máximo a la tensión perpendicular al grano (EMT).

$$EMT = \frac{Pm}{A}$$

(11)

Dónde: EMT = El esfuerzo máximo a la tensión perpendicular al grano (kgf/cm^2)

Pm = Carga máxima soportada por la probeta (kgf)

A = Área de la sección mínima (cm^2)

Dureza Janka

El ensayo de dureza se realizó en 6 probetas de prismas rectos cuyas dimensiones fueron de 2 x 2 x 2 pulgadas. Cada probeta fue ensayada en uno de los planos radial, tangencial y trasversal. El ensayo consistió en introducir una semiesfera de 1 cm^2 en cada una de las caras, con una velocidad de aplicación de carga de 6 mm/min, manteniéndola constante durante el ensayo hasta conseguir la penetración total de la semiesfera, instante en que se detiene la prensa y se retira la probeta. Los valores de la penetración se expresan directamente en kilogramos fuerza.

Cizalla o cortante paralelo al grano

Las probetas para el ensayo de cortante fueron 12 probetas de dimensiones de 2½ x 2 x 2 pulgadas recortada en una de sus caras. La mitad de la cantidad de probetas se preparó de manera que el plano de falla fuera tangente a los anillos de crecimiento y que la otra mitad de dicho plano sea radial, es decir, perpendicular a la tangente a los anillos de crecimiento. Las medidas de las probetas se comprueban en el momento del ensayo, con la precisión requerida de acuerdo con la finalidad del ensayo. Se colocó la probeta en el dispositivo de cortante de manera que la cara de 2 x 2½ quedara paralela a la pieza móvil y que su superficie soportara la presión de la carga. La probeta quedó ajustada al accesorio, para asegurar que la carga aplicada sobre la probeta produzca un esfuerzo de cortante paralelo puro. La velocidad utilizada fue de 0.6 mm/min; solo se registró la carga máxima:

Esfuerzo máximo de cortante (EM_v).

$$EM_v = \frac{Pm}{S}$$

(12)

Dónde: EM_v = Esfuerzo máximo de cortante (kgf/cm²)

Pm = Carga máxima soportada por la probeta (kgf)

S = Superficie del plano en que se produce el cortante (cm²)

Desgarre o clivaje

Se elaboraron 12 probetas con dimensiones de 3¾ x 2 x 2 pulgadas. La mitad se probaron de tal forma que la superficie de rajado fuera en un plano tangencial a los anillos de crecimiento y la otra mitad en un plano radial. La velocidad de aplicación de carga fue de 2.5 mm/min ± 0.6 mm/min, continuando el ensayo hasta que se produjo la rajadura de la probeta:

Resistencia máxima de clivaje (RMC).

$$RMC = \frac{Pm}{a}$$

(13)

Dónde: RMC = Resistencia máxima de clivaje (kgf/cm)

Pm = Carga máxima soportada por la probeta (kgf)

a = Ancho del plano de rajado de la probeta (cm)

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De acuerdo con los resultados obtenidos en los ensayos para las propiedades físicas y propiedades mecánicas y a la clasificación propuesta por (Bárcenas (1985); Fuentes *et al.*, (2002); IAWA (1989); FPL (1974); Aróstegui (1980); Ramos (1999); Sotomayor y Ramírez, 2013) la madera de la especie *T. grandis* L. f. procedente de la plantación forestal comercial de Nuevo Urecho, Michoacán tiene los siguientes características:

Propiedades físicas

Presenta una densidad básica de 0.59 g/cm^3 ; puede ser categorizada como una madera pesada según su densidad anhidra de 0.62 g/cm^3 (Tabla 8). Respecto a las propiedades relacionadas con cambios dimensionales de la madera, los valores obtenidos para las contracciones volumétrica, tangencial y radial; clasifican a la madera de teca como una madera de estabilidad estable en sus dimensiones, con una contracción volumétrica total muy baja (5.15%) (Tabla 8).

Tabla 8. Propiedades físicas de la madera de *Tectona grandis* L. f., Nuevo Urecho, Michoacán.

| Propiedad física | Prom. | Máx. | Mín. | Desviación Estándar | Clasificación | |
|---|-------------|------|-------|---------------------|---------------|--------------------------------|
| Contenido de Humedad (C.H) 48.04% | | | | | | |
| Densidad (g/cm³) | Básica | 0.59 | 0.62 | 0.52 | 0.02 | Medianamente |
| | Verde | 0.87 | 0.98 | 0.72 | 0.06 | pesada |
| | Anhidra | 0.62 | 0.66 | 0.55 | 0.02 | (FPL, 1974) |
| Contracción total (%) | Radial | 1.61 | 2.56 | 0.78 | 0.52 | Muy Baja |
| | | | | | | (Fuentes <i>et al.</i> , 2002) |
| | Tangencial | 2.99 | 7.28 | 1.74 | 1.49 | Muy Baja |
| | | | | | | (Fuentes <i>et al.</i> , 2002) |
| | Volumétrica | 5.15 | 10.08 | 3.61 | 1.79 | Muy baja |
| | | | | | | (Fuentes <i>et al.</i> , 2002) |
| Relación de Anisotropía (adimensional) | 2.02 | 4.36 | 0.98 | 1.03 | | Medio |
| | | | | | | (Sotomayor y Ramírez, 2013) |

T/R: Contracción tangencial, Contracción radial.

En el tabla 9 se muestra los valores de densidad básica para maderas de teca plantadas de otras procedencias y edades. El resultado de densidad básica obtenido en el presente estudio es similar a los resultados obtenidos en otros estudios para la madera de teca procedente de diferentes plantaciones en Bolivia de 8 años de edad con 0.58g/cm³ (Rivero y Moya 2012), y de México en plantaciones de 21 años de edad con una densidad básica de 0.60g/cm³ (Rodríguez *et al.* 2014), considerando que el valor de la densidad básica tiende a aumentar con la edad del árbol, al mismo tiempo que deben considerarse factores como la formación de madera juvenil, que en el caso de la madera joven de teca es un factor que influencia directamente su comportamiento (Bhat *et al.*, 2001).

La razón contracción total tangencial/contracción total radial es un índice para conocer el comportamiento dimensional de la madera durante el secado y la generación de defectos debido a distorsiones y alabeos, entre mayor sea, existe mayor probabilidad que ocurra una distorsión o deformación en la pieza de madera debido al cambio de humedad en un proceso de secado o cuando la madera esté en servicio (Muñoz y Moreno, 2013). El coeficiente diferencial T/R

indicó, que la contracción tangencial es dos veces la contracción radial (Tabla 8), coincidiendo con lo reportado por Simpson y Tenwolde (1999). Comparando las contracciones totales de la especie de otras procedencias (Tabla 9), Rivero y Moya (2012) en Bolivia reportan contracciones totales de 2.12% clasificándola como moderadamente estable. En plantaciones de Ecuador, *T. grandis* L. f. presentó 2.96% clasificándola como madera inestable (Gutiérrez *et al.* 2008), mientras que en Costa Rica, Muñoz y Moreno, (2013) la clasifican con baja deformación con 1.27%. En general, la especie de este estudio y de otras procedencias tiene estabilidad dimensional similar.

El resultado de la relación de anisotropía para la especie mostró un valor de 2.02 (Tabla 8), que de acuerdo con Sotomayor y Ramírez, (2013); se clasifica como medio y de acuerdo a Silva *et al.*, (2010), la estabilidad dimensional es un término cualitativo útil para calificar el movimiento dimensional de la madera expuesta a cambios cíclicos de humedad relativa del aire y temperatura, además permite tener una visión teórica sobre posibles distorsiones durante el secado o en el intervalo higroscópico de uso práctico de la madera (35% a 85% humedad relativa del aire).

Entre más bajos son los valores de anisotropías, se infiere una mayor estabilidad de la madera. Este valor coincide con los resultados obtenidos para plantaciones de teca evaluadas por Flórez *et al.*, (2014) en Brasil, obteniendo una relación de anisotropía media con 1.82 (Tabla 9); y para los estudios realizados en el Sureste de México, Rodríguez *et al.*, (2014) los resultados de clasificación de anisotropía van de media a alta (Tabla 9).

Tabla 9. Comparación de las propiedades físicas para *Tectona grandis* L. f. en estudios de otras procedencias.

| Propiedad física | Ecuador (Gutiérrez <i>et al.</i> , 2008) | Bolivia (Rivero y Moya, 2012) | Costa Rica (Muñoz y Moreno 2013) | Brasil (Flórez <i>et al.</i> , 2014) | México (Rodríguez <i>et al.</i> , 2014) | | |
|-------------------------------|---|----------------------------------|-------------------------------------|---|--|---------|---------|
| | | | | | Campeche | Tabasco | Chiapas |
| | 22 años | 8 años | 9 años | 13 años | 9 años | 15 años | 21 años |
| Contenido de Humedad (C.H) | 51.53 | 106.68 | - | - | - | - | - |
| Básica | - | 0.58 | 0.55 | 0.53 | 0.55 | 0.66 | 0.60 |
| Densidad (g/cm ³) | | Mediana | | Pesada | | | |
| Verde | 0.98 | - | 0.63 | - | - | - | - |
| Anhidra | 0.52 | 0.54 | - | 0.54 | - | - | - |
| | Mediana | Mediana | | | | | |
| Radial (%) | 2.04 | 2.57 | 4.34 | 2.40 | 0.76 | 1.00 | 0.73 |
| | | | Moderada | | | | |
| Contracción total | | | 5.34 | 4.21 | 1.8 | 1.9 | 1.8 |
| Tangencial (%) | 5.66 | 5.33 | | | | | |
| | | | Ligeramente grande | | | | |
| Volumétrica (%) | 8.11 | 8.01 | 7.40 | 6.84 | - | - | - |
| | Muy baja | Muy baja | Media | | | | |
| T/R (%) | 2.96 | 2.12 | 1.27 | - | - | - | - |
| | Alta o inestable | Moderadamente estable | Baja deformación | | | | |
| Relación de Anisotropía | - | - | - | 1.82 | 2.4 | 1.9 | 2.4 |

Propiedades mecánicas

Una de las principales funciones de la madera en el tronco y las ramas del árbol vivo es la de soporte mecánico. Una vez transformada la madera en algún producto, el soporte mecánico continúa desempeñando un papel esencial en una gran cantidad de usos. Las propiedades mecánicas de la madera son las relacionadas con su comportamiento ante la acción de fuerza externa o interna (Echenique y Robles, 1993).

Los resultados del ensayo de compresión paralela en la madera de *Tectona grandis* L. f. a la edad de 11 años realizados, observaron una resistencia de 326.18 kgf/cm² la cual se clasifica alta (Dávalos y Bárcenas, 1998), la compresión paralela ocurre cuando una fuerza actúa de manera paralela a las fibras y corresponde a la resistencia que opone una viga a una carga aplicada en el mismo sentido de la dirección de la fibra (Tabla 10). Este valor fue similar al encontrado por Rivero y Moya (2012) determinaron un valor de MOR de 460.59 kg/cm² y clasificándola como alta para una edad de 8 años (Tabla 11).

Los resultados del ensayo de compresión perpendicular en la madera de *Tectona grandis* L. f. muestran un esfuerzo de 33.62 kgf/cm² la cual se clasifica como bajo (Dávalos y Bárcenas, 1998 y Aróstegui, 1980) la compresión perpendicular ocurre cuando la fuerza solicitante actúa en dirección perpendicular a las fibras y corresponde a la resistencia que opone la madera a una carga aplicada en sentido perpendicular a la dirección de las fibras en una cara radial de la probeta (Tabla 10). Con respecto a los resultados de otros estudios de madera de teca Gutiérrez *et al.*, (2008) reporta un valor de ELP de 59.20 kg/cm² para plantaciones de 22 años de edad; estos valores difieren con Moya *et al.* (2012) quienes establecen que el valor de compresión perpendicular del ELP es de 263.00 kg/cm² (Tabla 11).

La resistencia de la madera a fuerzas que actúan perpendicularmente a la fibra y que tienden a dividir a un miembro se llama esfuerzo de tensión perpendicular a la fibra. Los resultados del ensayo de tensión perpendicular en estado verde de la madera, mostró un comportamiento de EMT de 41.29 kgf/cm² clasificando esta propiedad como media según Aróstegui, (1980) (Tabla 10) Esta información es útil para la industria de muebles para determinar el ensamblaje de madera conectado mecánicamente.

Los resultados del ensayo de desgarre o clivaje, observaron una RMC de 44.31 kgf/cm² que de acuerdo con Aróstegui, (1980) se clasifica como media (Tabla

10). Siendo superior a lo reportado por Moya *et al.*, (2012), obteniendo valores de clivaje de 5.90 a 6.50 kg/cm² clasificándola como baja (Tabla 11).

Los resultados del ensayo de cizalla de la madera de *Tectona grandis* L. f. mostró una resistencia baja a media de 63.20 kgf/cm², según Dávalos y Bárcenas (1998) y Aróstegui (1980) (Tabla 10). Estos resultados son menores a los reportados por Rodríguez *et al.*, (2014) en madera de plantaciones del Sureste Mexicano que va de 8.50 a 11.30 N/mm² y conforme a la clasificación de Prospect (1997), la madera de 9 y 15 años se cataloga como “blanda”, y la de 21 años como “muy blanda”.

Los resultados del ensayo de dureza en mostraron valores promedio de 545 kgf para los planos laterales (tangencial y radial), lo anterior permite clasificar su resistencia dentro del rango de maderas semiduras; mientras que para los extremos (transversal), se observaron valores de 611 kgf clasificándose también como madera semidura de acuerdo a Dávalos y Bárcenas (1998) (Tabla 10). Estos valores de dureza de la madera proveniente de Nuevo Urecho Michoacán son mayores a lo reportado en Ecuador por Gutiérrez *et al.*, (2008), en Bolivia por Rivero y Moya, (2012) y para la madera de teca del Sureste Mexicano (Rodríguez *et al.*, 2014) quienes la clasifican como blanda a muy blanda (Tabla 11).

Tabla 10. Propiedades mecánicas de la madera de *Tectona grandis* L. f., creciendo en Nuevo Urecho, Michoacán.

| Propiedad mecánica | Tipo de resistencia* | Resistencia media (kgf/cm ²) | Máx. (kgf/cm ²) | Mín. (kgf/cm ²) | Desviación | | Clasificación |
|-----------------------------------|----------------------|--|-----------------------------|-----------------------------|---------------------------------|---------|--|
| | | | | | Estándar (kgf/cm ²) | C.H (%) | |
| Compresión paralela al grano | ELP _c | 252.71 | 314.21 | 175.01 | 52.99 | 18.9 | Baja (Aróstegui, 1980) |
| | ECM _c | 326.18 | 368.83 | 287.74 | 31.13 | | Alta (Dávalos y Bárcenas 1998) |
| | MOE _c | 1820.53 | 2240.40 | 1275.88 | 326.01 | | Muy Alta (Aróstegui, 1980) |
| Compresión perpendicular al grano | ELP | 33.62 | 48.90 | 26.46 | 7.84 | 15.84 | Bajo (Dávalos y Bárcenas 1998) y Aróstegui, 1980 |
| Tensión Perpendicular | EMT | 41.29 | 55.4 | 26.15 | 8.32 | 24.17 | Media Aróstegui, 1980 |
| Desgarre o clivaje | RMC | 44.31 | 90.72 | 7.89 | 29.62 | 28.86 | Media Aróstegui, 1980 |
| Cizalla o cortante | EMV | 63.20 | 112.90 | 47.23 | 16.75 | 26.31 | Bajo Dávalos y Bárcenas 1998 Media Aróstegui, 1980 |
| Dureza Janka | Radial | 545.21 | 878.33 | 348.89 | 177.57 | 14.62 | Semidura |
| | Tangencial | 545.77 | 785.54 | 389.82 | 133.26 | | Dávalos y |
| | Transversal | 611.12 | 904.36 | 468.85 | 163.46 | | Bárcenas 1998 |

*ELP_c=Esfuerzo al Límite Proporcional. ECM_c= Esfuerzo a la Carga Máxima. MOE_c= Módulo de Elasticidad. ELP: Esfuerzo en el límite proporcional. EMT= Esfuerzo Máximo de Tensión. RMC= resistencia máxima de clivaje. EMV= Esfuerzo Máximo de Cortante.

Tabla 11. Valores promedio de propiedades mecánicas para madera de *Tectona grandis* L. f. en estudios de otras procedencias.

| Propiedad Mecánica | | Ecuador (Gutiérrez <i>et al.</i> , 2008) | Bolivia (Rivero y Moya, 2012) | Moya <i>et al.</i> , 2012 | Brasil (Flórez <i>et al.</i> , 2014) | México (Rodríguez <i>et al.</i> , 2014) | | |
|---|-----------------------|---|----------------------------------|------------------------------|---|--|---------------------------------|---------------------------------|
| | | | | | | Campeche (N/mm ²) | Tabasco (N/mm ²) | Chiapas (N/mm ²) |
| | | 22 años | 8 años | - | 13 años | 9 años | 15 años | 21 años |
| Flexión estática | MOR | 830.49 | 963.60 | 545 | 92-133 | 92 | 107 | 97 |
| | (kg/cm ²) | Bajo | Medio | | MPa | | | |
| | MOE x100 | 106,553.49 | 105,313.2 | 116,00 | 13046 | 8425 | 9479 | 9217 |
| | | Mediano | 0 Bajo | 0 | MPa | | Muy Bajo | |
| Compresión paralela al grano | MOR | 426.21 | 460.59 | 373.00 | 47.00 | 35.00 | 43.00 | 44.00 |
| | (kg/cm ²) | Bajo | Alta | | Mpa | | | |
| Compresión perpendicular al grano | ELP | 59.20 | 70.92 | 263.00 | - | 7301 | 10648 | 10920 |
| | (kg/cm ²) | Bajo | Mediana | | | | | |
| Dureza | Axial (kg) | 383.50 | 415.16 | 397.00 | 4,66 | 41.00 | 49.00 | 40.00 |
| | | Blanda | Blanda | | kN | | | |
| | Perpendicular (kg) | 423.50 | 357.60 | 401.00 | - | 20.00 | 28.00 | 21.00 |
| Resistencia al cizallaje | Tangencial | - | 125.15 | - | - | 9.70 | 11.30 | 8.50 |
| | (kg/cm ²) | | Alta | | | Blanda | Blanda | Muy blanda |
| | Radial | - | 122.65 | - | - | - | - | - |
| Clivaje | (kg/cm ²) | | Alta | | | | | |
| | Tangencial | - | - | 5.90 | - | - | - | - |
| | (kg/cm ²) | | | | | | | |
| Extracción de clavos | Radial | - | - | 6.50 | - | - | - | - |
| | (kg/cm ²) | | | | | | | |
| | Axial (kg) | 60.00 | 58.00 Alta | 40.00 | - | - | - | - |
| | | Alta | | | | | | |
| | Perpendicular | 86.50 | 54.00 Alta | 36.00 | - | - | - | - |
| | (kg) | Muy Alta | | | | | | |

MOR: Módulo de ruptura; MOE: Módulo de elasticidad; ELP: Esfuerzo en el límite proporcional.

CONCLUSIONES

La especie *Tectona grandis* L. f., de 11 años de edad proveniente de la plantación de Nuevo Urecho, Michoacán; presentó un valor promedio de densidad básica ($0,59 \text{ g/cm}^3$) el cual se encuentra dentro del intervalo reportado por Rivero y Moya 2012 en plantaciones de 8 años de edad en Bolivia con 0.58 g/cm^3 , y de México en plantaciones de 21 años de edad con una densidad básica de 0.60 g/cm^3 (Rodríguez *et al.* 2014), considerando que el valor de la densidad básica tiende a aumentar con la edad del árbol.

Pese a que se trata de madera joven; los resultados mostraron que algunas propiedades de la madera plantada en Nuevo Urecho, Michoacán; se aproximan a las de maderas de teca en estudios de otras procedencias; como la contracción volumétrica total que fue muy baja (5.15%) considerada de estabilidad estable en sus dimensiones. Para la compresión paralela se observó una resistencia de 326.18 kgf/cm^2 la cual se clasifica como alta.

Con respecto al ensayo de dureza (545 kgf) éste permite clasificar su resistencia dentro del rango de maderas semiduras; es mayor a lo reportado en Ecuador por Gutiérrez *et al.* (2008), en Bolivia por Rivero y Moya, (2012) y para la madera de teca del Sureste Mexicano (Rodríguez *et al.* 2014) quienes la clasifican como blanda a muy blanda.

Estos resultados obtenidos aplican principalmente para la zona de Nuevo Urecho, Michoacán y las condiciones de plantación y manejo previamente estudiadas ya que las propiedades físicas pueden verse afectadas por condiciones como clima, suelo y manejo.

REFERENCIAS

Aróstegui, V. 1980. Propiedades tecnológicas y uso de la madera de 40 especies del Bosque Nacional Alexander Von Humboldt. *Revista Forestal del Perú* 10(1-2): 3-82.

Bárcenas, P. 1985. Recomendaciones para el uso de 80 maderas de acuerdo con su estabilidad dimensional. Xalapa, México: Instituto de Investigaciones sobre Recursos Bióticos (INIREB), Laboratorio de Ciencia y Tecnología de la Madera (LACITEMA).

Bhat, K. M., P.B. Priya and P. Rugmini. 2001. Characterization of juvenile wood in teak. *Wood Science and Technology* 34(6):517-532.

CONAFOR 2014. Principales especies, maderables establecidas en PFC por año para el periodo 2000-2014.

COPANT (Comisión Panamericana de Normas Técnicas). 1972. Buenos Aires. Argentina.

Dávalos S. R., Bárcenas P. G. M. 1998. Clasificación de las propiedades mecánicas de las maderas mexicanas en condición “verde”. *Madera y Bosques* 4(1):65-70.

DETENAL, Dirección de Estudios del Territorio Nacional. 1979. Descripción de la leyenda de la carta edafológica. México. p: 87-89.

Echenique, M.R., Robles F.V F. 1993. Ciencia y tecnología de la madera I. Textos Universitarios, Universidad Veracruzana. 137 p.

Encalada, O. y Castillo, F. 1988. Propiedades físicas y mecánicas de diez especies forestales de la reserva forestal “La Zarza” en la Provincia de Zamora Chinchipe. Tesis Ing. For. Loja, Ecuador. Universidad Nacional de Loja. Facultad de Ciencias Agrícolas. Escuela de Ingeniería Forestal. 132p.

FAO. 2010. La teca: una visión global. <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/x4565s/X4565s02.PDF> (10 de marzo de 2016).

Flórez, J. B., Trugilho, P. F., Lima, J. T., Hein, P. R. G., y Silva, J. R. M. D. 2014. Caracterización de la madera joven de *Tectona grandis* L. f. plantada en Brasil. *Madera y bosques*, 20(1), 11-20.

Fonseca González, W. 2004. Manual para productores de teca (*Tectona grandis* L. f) en Costa Rica. Heredia, Costa Rica.

Forest Products Laboratory. 2010. Wood handbook—Wood as an engineering material. General Technical Report FPL-GTR-190. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. Madison, WI. USA. 508 p.

FPL (Forest Products Laboratory). 1974. Wood handbook: wood as an engineering material. USDA General Technical Report FPL-GTR-190. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 72 p.

Fuentes, F., Silva, J., Lomelí, M., Ricther, H., & Sanjuán, R. 2002. Comportamiento higroscópico de la madera de *Persea americana* var. *guatemalensis* Mill (Hass). *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 8(1), 49–56.

Fuentes-Salinas, M. 2000. Estimación del punto de saturación de la fibra (PSF) de las maderas. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 6(1), 79–81.

Gutiérrez, R. C., Romero, E. J., Cunuhay, P. S., Blanco, G. L., & Fonseca, C. S. 2008. Análisis comparativo de las propiedades físico-mecánicas de la madera de teca (*Tectona grandis* LF) de Quevedo y Balzar. *Revista Ciencia y Tecnología*, 1(2), 55-63.

IAWA (International Association of Wood Anatomy). 1989. List of microscopic features hardwood identification. IAWA Bulletin 10(3):220-359.

INAFED, Instituto para el Federalismo y el Desarrollo Municipal. 2010. Michoacán de Ocampo. Disponible en: <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM16michoacan/index.html> (Consultada: 24 de Febrero del 2016).

INEGI, Instituto Nacional de Estadística Geográfica e Informática. 1985. Síntesis Geográfica del Estado de Michoacán. Instituto Nacional de Estadística Geográfica e Informática. Secretaría de Programación y Presupuesto. México. D.F. 341 p.

ITTO International Tropical Timber Organization World Teak Conference 2013.

Moya Roque, R; Muñoz Acosta, F; Berrocal Jiménez, A. 2010. Teca: *Tectona grandis* L.f. Verbenaceae. Ficha técnica 7. In Tecnología de madera de plantaciones forestales: Fichas técnicas. Revista Forestal Mesoamericana Kurú 7(18-19):121-135.

Moya-Roque, R., Muñoz-Acosta, F., Salas-Garita, C., Berrocal-Jiménez, A., Leandro-Zúñiga, L., y Esquivel-Segura, E. 2012. Tecnología de madera de plantaciones forestales: Fichas técnicas. Revista Forestal Mesoamericana Kurú, 7(18-19), 1-217.

Muñoz-Acosta, F., y Moreno-Pérez, P. A. 2013. Contracciones y propiedades físicas de *Acacia mangium* Willd., *Tectona grandis* L. f. y *Terminalia amazonia* A. Chev, maderas de plantación en Costa Rica. Revista Chapingo. Serie ciencias forestales y del ambiente, 19(2), 287-304.

Prospect. 1997. The wood database. Version 2.1. Oxford Forestry Institut. London, UK. s/p

Ramos, P. D. 1999. Características y propiedades de la madera de *Quercus elliptica* Née. (Encino) del municipio de Morelia, Michoacán, México. Tesis Profesional de Ingeniería. Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera; Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, Michoacán. 54 p.

Rivero, J. 2004. Propiedades Físico-Mecánicas de *Gmelina arborea* Roxb. y *Tectona grandis* Linn.

Rivero-Moreno, J., y Moya-Roque, R. 2012. Propiedades físico-mecánicas de la madera de *Tectona grandis* Linn. F. (teca), proveniente de una plantación de ocho años de edad en Cochabamba, Bolivia. Revista Forestal Mesoamericana Kurú, 3(9), pág. 50-63.

Rodríguez Anda, Raúl, Zamora Natera, Juan Francisco, Silva Guzmán, José Antonio, Salcedo Pérez, Eduardo, y Fuentes Talavera, Francisco Javier. 2014. Propiedades físico-mecánicas de madera de teca de plantaciones comerciales. Revista mexicana de ciencias forestales, 5(24), 12-25.

Serrano, R; Canessa, R; Córdoba, R; Sáenz, M. 2000. Evaluación de características y propiedades tecnológicas para la madera de teca (*Tectona grandis*) de plantación. Cartago, CR, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Escuela de Ingeniería Forestal, Centro en Investigación Bosque Industria. Proyecto: Melina y Teca. Informe Técnico No.4, 193 p. (Determinación de las propiedades básicas para determinar posibles usos industriales).

Silva G., J. A., F. J. Fuentes T., R. Rodríguez A., P. A. Torres A., M. G. Lomelí R., J. Ramos Q. y C. Waitkus, H. G. Richter. 2010. Fichas de propiedades tecnológicas y usos de maderas nativas de México e importadas. Universidad de Guadalajara. Guadalajara, Jal. México. 207 p.

Simpson, W., and Tenwolde, A. 1999. Physical properties and moisture relations of wood. In USDA Forest Products Staff (Ed.), Wood handbook-Wood as an engineering material. General Technical Report FPL-GTR-113. Madison, WI,

USA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.

Skaar, C. 1972. Water in wood. Syracuse University Press. Syracuse, New York, USA. 218 p.

Sotomayor Castellanos, J. R., y Ramírez Pérez, M. 2013. Densidad y características higroscópicas de maderas mexicanas. Base de datos y criterios de clasificación. Investigación e Ingeniería de la Madera, 9(3), 3-29.

Stamm, A.J. 1971. Review of nine methods for determining the fiber saturation points of wood and wood products. Wood Science and Technology 4(2):114-128.

Tarkow H. 1979. Wood and moisture in wood, its structure and properties, Ed. F.F. Wangaard, Vol. I. Clark C. Heritage Memorial Series on Wood. EMMSE Project, Pennsylvania State University, University Park. 101-146 pp.

Valero, S., Reyes, E., y Garay, D. 2005. Estudio de las propiedades físico-mecánicas de la especie *Tectona grandis*, de 20 años de edad, proveniente de plantaciones de la Unidad Experimental de la Reserva Forestal Ticoporo, estado Barinas. Revista Forestal Venezolana, 49(1), 61-73.